



Localisation sonore par retournement temporel

Nadia Aloui

► To cite this version:

Nadia Aloui. Localisation sonore par retournement temporel. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Grenoble; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2014. Français. NNT : 2014GRENT079 . tel-01147611

HAL Id: tel-01147611

<https://theses.hal.science/tel-01147611>

Submitted on 30 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Signal, Image, Parole Et Télécoms**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Et de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TUNIS EL MANAR

Spécialité : **Télécommunications**

Présentée par

Nadia ALOUI

Thèse dirigée par **M.Kosai RAOOF** et
codirigée par **M.Ammar BOUALLEGUE**

préparée au sein du laboratoire **GIPSA-LAB** dans l'École
Doctorale EEATS
et de laboratoire **Sys'COM** dans l'École Doctorale **STI-ENIT**

Localisation sonore par retournement temporel

Thèse soutenue publiquement le **19 Décembre 2014**,
devant le jury composé de :

M. Emil NOVAKOV

Professeur

UJF, Grenoble

Président

M. Ridha BOUALLEGUE

Professeur

Sup'Com, Tunisie

Rapporteur

M. Rodolphe VAUZELLE

Professeur

Université de Poitiers, Poitiers

Rapporteur

M. Jean-Hugh THOMAS

MdC HDR

Université du Maine, ENSIM, Le Mans

Examinateur

M. Mohammad-Ali KHALIGHI

MdC HDR

Ecole centrale de Marseille, Marseille

Examinateur

M. Ammar BOUALLEGUE

Professeur émérite

ENIT, Tunisie

Co-directeur de thèse

M. Kosai RAOOF

Professeur

Université du Maine, ENSIM, Le Mans

Directeur de thèse

Mme Sonia Zaïbi

MdC

ENIT, Tunisie

Invitée



Remerciements

Mes remerciements s'adressent, en premier lieu, aux personnes qui m'ont proposé le sujet de thèse et qui m'ont dirigé durant ces années d'étude en me donnant ainsi l'opportunité de continuer ma formation dans la recherche.

D'abord, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à Monsieur **Ammar BOUALLEGUE**, qui s'est toujours soucié de m'offrir, de tout point de vue, les meilleures conditions de travail possibles. Je le remercie en particulier pour son enthousiasme, sa grande disponibilité, ses grandes qualités scientifiques et humaines. Merci Monsieur, de m'avoir donné l'opportunité de découvrir cette passion pour la recherche. Je vous dois vraiment beaucoup et les mots ne me suffisent pas pour vous exprimer ma gratitude et ma reconnaissance.

Je suis redevable de Monsieur **Kosai RAOOF**. Je le remercie pour son investissement important dans l'encadrement de mon travail. Je lui suis reconnaissante de la confiance sans faille qu'il m'a témoignée. Merci Monsieur, pour l'aide inconditionnelle que vous m'avez apportée tout le long de mes années de thèse, pour vos conseils avisés, vos encouragements, mais aussi pour vos qualités humaines, votre enthousiasme et sympathie.

Je tiens à remercier Madame **Sonia ZAIBI**, maître assistante à l'école nationale d'ingénieurs de Tunis, pour ses remarques pertinentes, ses conseils avisés et ses encouragements.

Je remercie vivement **Stéphane LETOURNEUR**, Ingénieur de Recherche au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, pour son aide très précieuse et sa motivation au cours des expérimentations que j'ai effectuées à l'école nationale supérieure d'ingénieurs du Mans.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **Emil NOVAKOV**, Professeur à l'Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique, d'avoir aimablement accepté de présider ce jury.

J'exprime mes remerciements très sincères à Monsieur **Ridha BOUALLEGUE**, Professeur à SUP'COM de Tunis, et Monsieur **Rodolphe VAUZELLE**, Professeur à l'Université de Poitiers, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de rapporter cette thèse.

Je remercie également Monsieur **Jean-Hugh THOMAS**, enseignant-chercheur à l'école nationale supérieure d'ingénieurs du Mans, et Monsieur **Mohammad-Ali KHALIGHI**, enseignant-chercheur à l'école centrale de Marseille, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en me faisant l'honneur de l'examiner.

Mes vifs remerciements sont également adressés à tout le personnel de l'Institut Français de Coopération en Tunisie pour avoir financé mes travaux de recherche durant

les trois années de ma thèse. Merci à Mme **Imen ANNABI** et Mme **Selma HANNA-CHI** de l'IFC-Tunisie et Mme **Emmanuelle BERETTA** de campusfrance-Grenoble d'avoir mené à bien mes préparatifs de séjours en France.

La bonne ambiance qui règne au laboratoire de recherche, Sys'Com de l'ENIT et le laboratoire gipsa-lab de l'Université de Grenoble participe des bonnes conditions qui m'ont permis d'effectuer ce travail. Je remercie donc tous les membres de ces laboratoires ainsi que les équipes de stagiaires et thésards pour leur sympathie. Un merci tout particulier à Monsieur **Tahar EZZIDINE**, Maître de conférences à l'ENIT, et Monsieur **Mahmoud AMMAR**, Maître assistant à l'ENIT, pour leurs soutiens et conseils.

Je n'oublis pas non plus ma très chère **Zeina ABU-AISHEH** qui m'a beaucoup soutenue tout le long de ma thèse. Un grand merci à tous mes amis en particulier à mes chères **Haifa ZGHONDA**, **Hela BEN GHARBIA** et **Houda ATTIA** pour leur soutien, patience et sympathie. Je remercie également mes chers amis **Awatif ROUIJEL**, **Fakhri TORKHANI**, **Nikola BESIC**, **Gildas RIVIERE** et **Hajer EL AGHA** pour leur sympathie et leur bonne humeur permanente.

Enfin, pour leur soutien permanent et sans faille, je tiens à remercier de tout cœur mes chers parents **Hamida** et **Mohamed**, mes deux adorables sœurs **Hajer** et **Asma**, mon très cher frère **Khaled**, ma belle-sœur **Ameni** et plus particulièrement mon adorable neveu **Yassine** qui a rempli ma vie de joie et de bonheur.

A la fin, je voudrais exprimer mes remerciements à tous ceux que je n'ai pu citer mais qui ont toutes mes amitiés et mes remerciements.

Résumé

L'objectif général de cette thèse était de proposer une solution de localisation en intérieur à la fois simple et capable de surmonter les défis de la propagation dans les environnements en intérieur. Pour ce faire, un système de localisation basé sur la méthode des signatures et adoptant le temps d'arrivée du signal de l'émetteur au récepteur comme signature, a été proposé. Le système présente deux architectures différentes, une première orientée privée utilisant la méthode d'accès multiple à répartition par code et une deuxième centralisée basée sur la méthode d'accès multiple à répartition dans le temps. Le système calcule la position de l'objet d'intérêt par la méthode de noyau. Une comparaison expérimentale entre le système à architecture orientée privée et un système de localisation sonore déjà existant et basé sur la méthode de trilatération, a permis de confirmer les résultats trouvés dans le cas de la localisation par ondes radiofréquences. Cependant, nos expérimentations étaient les premières à montrer l'effet de la réverbération sur les approches de la localisation acoustique.

Dans un second lieu, un système de localisation basé sur la technique de retournement temporel, permettant une localisation simultanée de sources avec différentes précisions, a été testé par simulations en faisant varier le nombre de sources. Ce système a été ensuite validé par expérimentations. Dans la dernière partie de notre étude, nous nous sommes intéressés à la réduction de l'audibilité du signal utile à la localisation par recours à la psycho-acoustique. Un filtre défini à partir du seuil d'audition absolu a été appliqué au signal de localisation. Nos résultats ont montré une amélioration de la précision de localisation comparé au système de localisation sans modèle psycho-acoustique et ce grâce à l'utilisation d'un filtre adapté au modèle psycho-acoustique à la réception. Par ailleurs, l'écoute du signal après application du modèle psycho-acoustique a montré une réduction significative de son audibilité comparée à celle du signal original.

Mots clés : localisation en intérieur, méthode des signatures, méthode de noyau, méthode d'accès multiple à répartition par code, méthode d'accès multiple à répartition dans le temps, trilatération, retournement temporel, psycho-acoustique, aspect multi-échelle, aspect multi-sources.

Abstract

The objective of this PhD is to propose a location solution that should be simple and robust to multipath that characterizes the indoor environments. First, a location system that exploits the time domain of channel parameters has been proposed. The system adopts the time of arrival of the path of maximum amplitude as a signature and estimates the target position through nonparametric kernel regression. The system was evaluated in experiments for two main configurations : a privacy-oriented configuration with code-division multiple-access operation and a centralized configuration with time-division multiple-access operation. A comparison between our privacy-oriented system and another acoustic location system based on code-division multiple-access operation and lateration method confirms the results found in radiofrequency-based localization. However, our experiments are the first to demonstrate the detrimental effect that reverberation has on acoustic localization approaches. Second, a location system based on time reversal technique and able to localize simultaneously sources with different location precisions has been tested through simulations for different values of the number of sources. The system has then been validated by experiments. Finally, we have been interested in reducing the audibility of the localization signal through psycho-acoustics. A filter, set from the absolute threshold of hearing, is then applied to the signal. Our results showed an improvement in precision, when compared to the location system without psychoacoustic model, thanks to the use of matched filter at the receiver. Moreover, we have noticed a significant reduction in the audibility of the filtered signal compared to that of the original signal.

Key Words : indoor localization, fingerprinting technique, nonparametric kernel regression, code-division multiple-access operation, time-division multiple-access operation, lateration, time reversal, psycho-acoustic model, different precisions, simultaneous location.

Abbreviations

GPS	G lobal P ositioning S ystem
ToA	T ime o f A rrival
TDoA	T ime D ifference of A rrival
AoA	A ngle o f A rrival
DoA	D irection o f A rrival
WLAN	W ireless L ocal A rea N etwork
RFID	R adio F requency I Dentification
UWB	U ltra- W ide B and
TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess
CDMA	C ode D ivision M ultiple A ccess
RSB	R apport S ignal à B ruit

Table des matières

Remerciements	i
Abbreviations	iv
Table des figures	viii
Liste des Tableaux	xi

Introduction	1
1 Technologies, Techniques et Systèmes de localisation	5
1.1 Introduction	5
1.2 Localisation et système de localisation	6
1.3 Localisation dans les environnements externes	6
1.3.1 Le système GPS	6
1.3.2 Les réseaux cellulaires	7
1.4 Localisation dans les environnements internes	8
1.4.1 Modèle du canal de propagation acoustique	8
1.4.2 Paramètres du canal utiles à la localisation	11
1.4.2.1 Le temps d'arrivée (ou ToA pour Time of Arrival)	11
1.4.2.2 La différence de temps d'arrivée (ou TDoA pour Time Difference of Arrival)	12
1.4.2.3 Angle d'arrivée (ou AoA pour Angle of Arrival ou DoA pour Direction of Arrival)	13
1.4.2.4 Puissance du signal reçu	14
1.4.3 Techniques de localisation	14
1.4.3.1 La technique de proximité	14
1.4.3.2 Méthode de triangulation	15
1.4.3.3 Méthode des signatures (ou méthode des empreintes di- gitales)	17
1.4.4 Critères d'évaluation des systèmes de localisation en intérieur	19
1.4.4.1 Respect de la vie privée (ou en anglais Security and privacy)	20
1.4.4.2 Coût	20
1.4.4.3 Performance	21
1.4.4.4 Complexité	22
1.4.5 Technologies et systèmes de localisation	22
1.4.5.1 Systèmes de localisation par ondes infrarouges	22

1.4.5.2	Systèmes de localisation par ondes ultrasonores	23
1.4.5.3	Systèmes de localisation par ondes radiofréquences	25
1.4.5.4	Systèmes de localisation par son audible	28
1.5	Conclusion	30
2	Evaluation des performances d'un système de localisation acoustique destiné aux environnements internes et basé sur la technique des em- preintes	31
2.1	Introduction	31
2.2	Système de localisation proposé	32
2.2.1	Méthode d'accès multiple à répartition dans le temps	33
2.2.2	Méthode d'accès multiple à répartition en codes	33
2.2.2.1	Les m-séquences	34
2.2.2.2	Les séquences de Gold	34
2.2.3	Méthode des signatures	35
2.2.3.1	Phase de calibrage	35
2.2.3.2	Phase en ligne	37
2.3	Evaluation expérimentale des performances du système proposé	41
2.3.1	Description du site d'expérimentation	42
2.3.2	Matériel	42
2.3.3	Système de localisation à architecture orientée privée	44
2.3.3.1	Performance du système de localisation à architecture orientée privée	45
2.3.3.2	Comparaison avec un système de localisation sonore à étalement de spectre	47
2.3.3.3	Effet du nombre des haut-parleurs	49
2.3.4	Système de localisation à architecture centralisée	52
2.3.4.1	Performance du système de localisation à architecture centralisée	53
2.4	Conclusion	55
3	Système de localisation multi-échelles basé sur la méthode de retour- nement temporel	56
3.1	Introduction	56
3.2	Quelques notions de base relatives à la technique de retournement tempo- rel	57
3.2.1	Retournement temporel et concept de la cavité à retournement temporel	57
3.2.2	Miroir à retournement temporel	58
3.2.3	Retournement temporel de point de vue du traitement de signal	58
3.2.4	Diagrammes de corrélation spatiale (ou diagrammes de directivité par analogie avec la physique)	60
3.3	Système de localisation proposé	63
3.3.1	Scénario de localisation	63
3.3.2	Algorithme du recuit simulé [43]	63
3.4	Evaluation des performances du système de localisation	65
3.4.1	Evaluation par simulations	65
3.4.1.1	Modèle de la salle	66

3.4.1.2	Réglage des paramètres de recuit simulé	67
3.4.2	Evaluation par expérimentations	72
3.4.2.1	Protocole expérimental	73
3.4.2.2	Matériel	74
3.4.2.3	Tests préliminaires	75
3.4.2.4	Digrammes de corrélation spatiale	79
3.4.2.5	Réglage des paramètres du recuit simulé	80
3.5	Délai de localisation du système proposé	87
3.5.1	Réduction du pas de déplacements	88
3.5.1.1	Réduction du pas de déplacements en basse fréquence . .	88
3.5.1.2	Réduction du pas de déplacements en haute fréquence . .	90
3.5.1.3	Réduction du délai de localisation par ajout d'une nou- velle échelle	90
3.6	Conclusion	92
4	Localisation simultanée des sources par retournement temporel	94
4.1	Introduction	94
4.2	Système de localisation multi-échelle et multi-sources	95
4.3	Evaluation des performances du système de localisation	97
4.3.1	Evaluation par simulations	97
4.3.2	Evaluation par expérimentations	101
4.3.2.1	Description du site d'expérimentation	102
4.3.2.2	Protocole expérimental	105
4.3.2.3	Matériel	105
4.3.2.4	Digrammes de corrélation spatiale	107
4.3.2.5	Précision de localisation des sources	107
4.4	Application d'un modèle psycho-acoustique	113
4.4.1	Anatomie de l'oreille	113
4.4.2	Seuil d'audition absolu	114
4.4.3	Réduction de l'audibilité du signal de localisation	114
4.4.3.1	Résultats de simulations	116
4.5	Conclusion	119
	Conclusion générale	120
	Bibliographie	123

Table des figures

1.1	Méthode de tracé de rayons.	10
1.2	Méthode des hyperboles.	12
1.3	Localisation par la méthode d'angulation [8].	16
1.4	Méthode des signatures.	17
2.1	Principe d'accès TDMA.	33
2.2	Principe d'accès CDMA.	34
2.3	Corrélation du signal reçu par l'un des signaux émis par les sources. . . .	36
2.4	Configuration du système de localisation proposé.	37
2.5	Photos du site d'expérimentation.	42
2.6	Signal reçu.	43
2.7	Schéma de raccordement du système de localisation.	43
2.8	1 ^{er} banc de test du système de localisation à architecture orientée privée. .	44
2.9	Précision de localisation pour une erreur de 8.5 cm en fonction du nombre de références.	45
2.10	Distribution de la précision pour une erreur de 8.5 cm, $M = 7$	46
2.11	Distribution de la précision pour une erreur de 8.5 cm, $M = 10$	46
2.12	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de loca- lisation du système proposé et de celui présenté dans [3].	48
2.13	2 ^{ème} banc de test du système de localisation à architecture orientée privée. .	49
2.14	Précision de localisation pour une erreur de 8.5 cm en fonction du nombre de positions de référence, 4 haut-parleurs.	51
2.15	Précision de localisation pour une erreur de 8.5 cm en fonction du nombre de positions de référence, 3 meilleurs haut-parleurs.	51
2.16	Précision en fonction de l'erreur de localisation, cas de 4 haut-parleurs et cas de 3 meilleurs haut-parleurs	52
2.17	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de loca- lisation du système proposé et de celui présenté dans [3], cas de 3 meilleurs haut-parleurs.	52
2.18	Banc de test du système de localisation à architecture centralisée.	53
2.19	Précision de localisation pour une erreur de 2.7 cm en fonction du nombre de positions de référence.	54
2.20	Distribution de la précision pour une erreur de 2.7 cm, $M = 7$	55
3.1	Diagrammes de corrélation spatiale obtenus avec $f = 200$ Hz et $d =$ 1.2 m pour différentes sources : (a) $SS1$ (1.96m, 2.08m, 1.5m), (b) $SS2$ (2.73m, 1.93m, 1.5m) et (c) $SS3$ (2.72m, 1.14m, 1.5m).	61

3.2	Diagrammes de corrélation spatiale de la source $SS1$ obtenue pour $d = 1.2$ m et pour différentes valeurs de la fréquence : (a) $f = 4$ kHz, (b) $f = 800$ Hz et (c) $f = 200$ Hz.	62
3.3	Coupe transverse du diagramme de corrélation spatiale de la source $SS1$ dans le plan $y = 2.08$ m.	65
3.4	Disposition des sources à localiser dans la salle.	67
3.5	Précision moyenne en fonction de l'erreur de localisation obtenue pour différentes valeurs de température, $f = 200$ Hz.	68
3.6	Précision moyenne en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec la méthode du recuit simulé en basse fréquence et avec un déplacement régulier du récepteur en haute fréquence.	70
3.7	Photos du site d'expérimentation.	72
3.8	Zone de mesure.	73
3.9	Schéma de raccordement du système de localisation.	74
3.10	Module de la Transformée de Fourier du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.	75
3.11	Premiers échantillons du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.	76
3.12	Réponse en fréquence et en impédance (Frequency and Impedance response) du haut-parleurs utilisé [44].	77
3.13	Module de la transformée de Fourier du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.	77
3.14	Premiers échantillons du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.	78
3.15	Module de la Transformée de Fourier du signal reçu à 10 cm du microphone, $f \in \{200Hz, 4kHz\}$	79
3.16	Module de la Transformée de Fourier du signal reçu, $f \in \{200Hz, 4kHz\}$	79
3.17	Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S1$: (a) 200 Hz, (b) 4 kHz.	80
3.18	Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S1$: (a) 200 Hz, (b) 4 kHz.	81
3.19	Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S2$: (a) 200 Hz, (b) 4 kHz.	82
3.20	Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S2$: (a) 200 Hz, (b) 4 kHz.	83
3.21	Précision en fonction de l'erreur de localisation pour différentes valeurs de température.	83
3.22	Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenu avec différentes valeurs de N_p et $T = 0.1$	85
3.23	Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec $M_f = 3$	91
4.1	Disposition des sources à localiser dans la salle, $N = 2$	98
4.2	Disposition des sources à localiser dans la salle, $N = 4$	99
4.3	Disposition des sources à localiser dans la salle, $N = 9$	99
4.4	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 2, 4\}$ et $f = 200Hz$	100
4.5	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 2, 4\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz\}$	100
4.6	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 2, 4\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$	101
4.7	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 9\}$ et $f = 200Hz$	102
4.8	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 9\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz\}$	102

4.9	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 9\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$.	103
4.10	Disposition des 20 sources à localiser dans la salle, $N = 1$.	103
4.11	Disposition des 36 sources à localiser dans la salle, $N = 1$.	104
4.12	Photos du site d'expérimentation, 1 ère angle de vue.	104
4.13	Photos du site d'expérimentation, 2 ème angle de vue.	104
4.14	Zone de mesure.	105
4.15	Schéma de raccordement du système de localisation.	106
4.16	Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S1$: (a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.	108
4.17	Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S1$: (a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.	109
4.18	Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S2$: (a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.	110
4.19	Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S2$: (a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.	111
4.20	Structure de l'oreille [49].	114
4.21	Seuil d'audition absolu.	115
4.22	Réponse impulsionnelle normalisée du filtre, $h(t)$.	115
4.23	Produit de convolution linéaire des réponses impulsionnelles des filtres $h(t)$ et $g(t)$.	116
4.24	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique et avec le système avec modèle psycho-acoustique, $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$ et $RSB = 10$ dB.	117
4.25	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique et avec le système avec modèle psycho-acoustique, $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$ et $RSB = 20$ dB.	117
4.26	Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique et avec le système avec modèle psycho-acoustique, $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$ et $RSB = 30$ dB.	118

Liste des tableaux

2.1	Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec le système de localisation à architecture orientée privée.1 ^{er} banc de test.	45
2.2	Distribution de la précision pour une erreur de 8.5 cm.	47
2.3	Précision en fonction de l'erreur de localisation du système de localisation à architecture orientée privée.2 ^{ème} banc de test.	49
2.4	Précision en fonction de l'erreur de localisation du système à architecture orientée privée utilisant 4 haut-parleurs ou 3 meilleurs haut-parleurs. . . .	50
2.5	Précision en fonction de l'erreur de localisation du système à architecture orientée privée, $M \in \{6, 7\}$	50
2.6	Précision en fonction de l'erreur de localisation du système de localisation à architecture centralisée.	53
2.7	Précision en fonction de l'erreur de localisation du système de localisation à architecture centralisée, $M = 7$	54
3.1	Positions des transducteurs.	66
3.2	Précision moyenne pour une erreur de 8 cm obtenue avec différentes valeurs de température, $f = 200$ Hz.	68
3.3	Nombre moyen de solutions acceptées obtenu avec différentes valeurs de température.	69
3.4	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de température et $f = 200$ Hz.	69
3.5	Précision par position pour une erreur de localisation de 1 cm obtenue avec différentes valeurs de température.	71
3.6	Précision par position pour une erreur de localisation de 1 cm obtenue avec différentes valeurs de N_p et $T = 100$	71
3.7	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de N_p , $T = 100$ et $f = 200$ Hz.	72
3.8	Précision de localisation de la source $S1$ pour une erreur de 0 cm obtenue pour différentes valeurs de T	82
3.9	Nombre moyen de solutions acceptées obtenu avec différentes valeurs de T et $N_p \in \{1, 4\}$	84
3.10	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de T , $N_p \in \{1, 4\}$ et $f = 200$ Hz.	84
3.11	Précision de localisation de la source $S1$ pour une erreur de 0 cm obtenue pour différentes valeurs de N_p et $T = 0.1$	85
3.12	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de N_p , $T = 0.1$ et $f = 200$ Hz.	86
3.13	Précision de localisation de la source $S2$ pour une erreur de 0 cm obtenue avec différentes valeurs de T et $N_p \in \{1, 4\}$	86

3.14	Nombre moyen de solutions acceptées obtenu avec différentes valeurs de T et $N_p \in \{1, 4\}$	86
3.15	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu pour différentes valeurs de T , $N_p \in \{1, 4\}$ et $f = 200$ Hz.	87
3.16	Précision de localisation de la source $S2$ pour une erreur de 0 cm obtenu avec différentes valeurs de N_p et $T = 0.1$	87
3.17	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de N_p , $T = 0.1$ et $f = 200$ Hz.	87
3.18	Précision pour une erreur de localisation de 1 cm obtenu avec différents pas de déplacement, $T = 100$ et $N_p = 4$	88
3.19	Précision par position pour une erreur de 1 cm obtenu avec différents pas de déplacement, $T = 100$ et $N_p = 4$	88
3.20	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différents pas de déplacement, $T = 100$, $N_p = 4$ et $f = 200$ Hz.	89
3.21	Précision moyenne pour une erreur de localisation de 1 cm, $T = 0$, $N_p = 1$ et pas=6 cm.	89
3.22	Précision par position pour une erreur de 1 cm, $N_p = 1$, $T = 0$ et pas=6 cm.	89
3.23	Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec $N_p = 1$, $T = 0$, pas=6 cm et $f = 200$ Hz.	89
3.24	Précision par position pour des erreurs de 1 cm et 1.5 cm, $N_p = 1$, $T = 0$, pas= 6 cm.	90
3.25	Précision par position pour des erreurs de 1 cm, 1.5 cm et 2.3 cm, obtenue avec $M_f = 3$	92
4.1	Positions des transducteurs.	97
4.2	Valeurs des paramètres utilisés.	98
4.3	Précision pour une erreur de localisation inférieure ou égale à 14 cm pour $N \in \{1, 2, 4, 9\}$ et $f = 200$ Hz.	101
4.4	Précision en fonction de l'erreur de localisation de la source $S1$	112
4.5	Précision en fonction de l'erreur de localisation de la source $S2$	112
4.6	Nombre moyen de déplacements du récepteur.	112

Introduction générale

Pour longtemps, la localisation a été utilisée pour des applications militaires dans les milieux externes dans le but de repérer avec précision la position des combattants sur le terrain. Aujourd'hui, ce domaine connaît un réel essor et offre ses services à divers consommateurs non seulement dans les environnements externes mais également dans les environnements internes.

La localisation en extérieur a été dominée par le système GPS (pour Global Positioning System) grâce à la couverture maximale qu'il offre et la bonne précision qu'il atteint. Cependant, l'utilisation d'un tel système dans les environnements intérieurs montre une précision de localisation médiocre en raison de l'absence de la visibilité directe entre le récepteur et les satellites GPS. Dès lors, il s'avère nécessaire de développer d'autres systèmes de localisation destinés aux environnements internes.

Dans ces dernières années, un intérêt considérable a été porté à la conception de ces systèmes, et ce en raison des applications intéressantes qu'ils offrent aussi bien dans le domaine grand public que dans le domaine de la sécurité publique. Parmi ces applications, nous citons à titre d'exemples la détection de l'emplacement d'une personne perdue et la localisation des produits stockés dans un entrepôt. Par ailleurs, dans le domaine de la sécurité publique, la localisation permet de surveiller les équipements coûteux présents dans les hôpitaux et dans les grandes compagnies.

Différentes technologies ont été déployées dans les systèmes de localisation en intérieur dont la plus populaire est la technologie radiofréquence. La localisation par ondes radiofréquence tire ses bénéfices de l'exploitation des infrastructures de réseaux existantes. En revanche, elle estime la position de l'objet d'intérêt avec des erreurs de l'ordre de plusieurs mètres. Contrairement à la radiofréquence, l'exploitation de la technologie infrarouge dans la localisation en intérieur permet une très bonne précision de localisation mais requiert une infrastructure très coûteuse. Le recours à d'autres technologies s'avère alors nécessaire afin d'assurer un compromis entre performance et coût.

Dans ce contexte, l'acoustique peut être envisagée comme une approche intéressante ayant le potentiel d'offrir de bonnes performances à faible coût. Le son présente un

intérêt dans la conception des systèmes de localisation en intérieur puisqu'il est déployé par la plupart des appareils mobiles.

Equipée d'une ou de plusieurs technologies, les systèmes de positionnement en intérieur utilisent différentes techniques de localisation telles que la triangulation et la méthode des signatures.

De nombreux systèmes de localisation acoustique se sont basés sur la méthode de triangulation. Dans ces systèmes, les composants fixes sont positionnés au plafond dans l'objectif d'assurer la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur, condition nécessaire pour l'application de la méthode de triangulation. Cependant, bien que fixés au plafond, la ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur peut être occultée par des obstacles. Dès lors, il est préférable de déployer des méthodes de localisation qui soient indépendantes des conditions de propagation entre l'émetteur et le récepteur et qui soient applicables à n'importe quel environnement intérieur.

La méthode des empreintes ne fait aucune supposition sur l'existence du trajet direct entre l'objet à localiser et les composants fixes du système. Cette méthode compare les données de localisation obtenues pour l'objet d'intérêt à un ensemble de données de localisation préalablement mesurées à des emplacements représentatifs pour les positions possibles de l'objet. La méthode requiert alors la construction d'une base de données contenant des positions de référence (i.e., des emplacements représentatifs pour les positions possibles de l'objet) et des données de localisation identifiant d'une manière unique chacune de ces positions. A partir de cette base de données, la position de l'objet d'intérêt est alors estimée moyennant un algorithme de positionnement.

Outre la méthode des empreintes, la technique de retournement temporel présente une technique de focalisation très puissante dans les milieux complexes. Cette technique tire ses bénéfices des trajets multiples. En effet, elle réduit le canal multi-trajets à sa fonction d'auto-corrélation qui ressemble à une fonction de Dirac. Dès lors, il s'avère intéressant de déployer cette technique pour la localisation dans les environnements faisant l'objet des réflexions, des réfractions et des diffusions tels que les environnements intérieurs.

L'objectif général de cette thèse est alors de proposer une solution de localisation en intérieur à la fois simple et capable de surmonter les défis de la propagation dans les environnements en intérieur. En premier lieu, nous mettons en évidence l'effet de la réverbération acoustique sur les approches de la localisation acoustique telle que la triangulation et nous proposons un système de localisation à l'intérieur d'une salle permettant de localiser un récepteur ou une source sonore. En second lieu, nous visons à développer un système de localisation permettant de localiser simultanément plusieurs sources avec différentes précisions.

Ce mémoire de thèse est constitué de quatre chapitres. Ils sont organisés comme suit :

Le premier chapitre décrit les principaux techniques et algorithmes de localisation déployés dans les systèmes de positionnement en intérieur. Il présente également les avantages et les inconvénients des différentes technologies déployées ainsi qu'un état de l'art des systèmes de localisation les plus marquants.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons un nouveau système de localisation acoustique à l'intérieur d'une salle [1] [2]. Ce système déploie la méthode des signatures et adopte le temps d'arrivée du signal de l'émetteur au récepteur comme signature. Le système est évalué par expérimentations dans deux architectures : une architecture orientée privée en utilisant la méthode d'accès multiple à répartition par code (ou CDMA pour Code division multiple access) et une architecture centralisée en utilisant la méthode d'accès multiple à répartition dans le temps (ou TDMA pour Time division multiple access). L'effet de la variation des paramètres du système tels que le nombre des haut-parleurs, leurs positions et le nombre de positions de référence est examiné. A l'issue de cette étude, nous proposons un critère de choix des mesures les plus fiables pour l'estimation de la position. Par ailleurs, une comparaison expérimentale entre notre système à architecture orientée privé et un système de localisation, déjà existant et basé sur la méthode de trilatération [3] est menée. Cette comparaison mettra en évidence l'effet de la réverbération acoustique sur les approches de la localisation acoustique.

Dans le troisième chapitre, nous déployons la méthode du retournement temporel afin de développer un système permettant une localisation avec différentes précisions [4]. Le principe de ce système consiste à envoyer simultanément des signaux modulés à différentes fréquences. En fonction de la précision souhaitée, le récepteur choisit une fréquence particulière et se déplace, dans la zone d'intérêt à la recherche de la position qui maximise l'énergie du signal reçu. Les performances de ce système sont évaluées par simulations moyennant le modèle du canal acoustique d'Allen et Berkeley. Une validation des résultats de simulations est effectuée par des expérimentations menées dans une salle de Travaux Pratiques de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans.

Le dernier chapitre étend le système de localisation multi-échelle décrit dans le troisième chapitre au cas de plusieurs sources [5] [6]. Le système est capable d'estimer simultanément plusieurs sources avec différentes précisions grâce à la méthode d'accès multiple à répartition par code. Le système pourrait être appliqué afin de permettre à un récepteur sonore d'atteindre sa destination souhaitée parmi plusieurs destinations possibles. Les performances de ce système sont évaluées par simulations et validées par expérimentations. Pour terminer, nous nous intéressons à réduire l'audibilité du signal émis par recours à la psycho-acoustique. Un filtre défini à partir du seuil d'audition absolu est alors appliqué au signal de localisation. Une comparaison des performances du

système de localisation avec modèle psycho-acoustique et du système de localisation sans modèle psycho-acoustique est établie en termes de précision de localisation et d'audibilité du signal émis.

Chapitre 1

Technologies, Techniques et Systèmes de localisation

1.1 Introduction

La localisation a connu un réel essor grâce à ses intéressantes applications dans le domaine grand public et celui de la sécurité publique et militaire. Nous citons à titre d'exemples, la localisation d'un colis dans un entrepôt et les systèmes de surveillance des personnes âgées et des équipements coûteux. Dans les domaines de la sécurité publique et militaire, nous citons les systèmes de localisation et de suivi des pompiers à l'intérieur des bâtiments en feu.

Dans le contexte de cette thèse, deux applications de la localisation sont possibles. La première consiste à localiser une atteinte d'Alzheimer tout au long de sa journée. Celle-ci pourra, par la suite, profiter de ses déplacements enregistrés afin de déterminer la position de ses affaires qu'elle a perdues. La deuxième application possible est de permettre à l'utilisateur d'atteindre une destination souhaitée. Celle-ci correspond à un objet que l'utilisateur souhaite trouver.

Dans ce premier chapitre, nous abordons les concepts de base de la localisation. Avant de présenter les différents paramètres du canal utiles à la localisation, nous introduisons le modèle du canal d'Allen et Berkley. Nous présentons, par la suite, les principaux techniques et algorithmes de localisation ainsi que les principaux critères d'évaluation des systèmes de positionnement. Pour terminer, nous présentons, les différentes technologies déployées dans les systèmes de localisation en intérieur ainsi que leurs avantages, leurs inconvénients et un état de l'art des systèmes de localisation les plus marquants.

1.2 Localisation et système de localisation

La localisation se réfère au procédé de l'estimation de la position d'un objet d'intérêt par rapport à un ensemble de références disposées à l'intérieur d'un espace prédéfini. Un système de localisation calcule la position du dispositif d'intérêt et transfère la position estimée aux services de positionnement tels que la navigation et la surveillance. Quelques systèmes de surveillance ont été utilisés dans les hôpitaux afin de surveiller les équipements médicaux et éviter leurs vols. Des systèmes de navigation ont également été déployés dans les espaces publics afin de guider leurs utilisateurs.

Un système de localisation en intérieur se limite à l'estimation de la position dans les environnements internes tels que l'intérieur d'un bâtiment. Dempsey [7] définit un système de positionnement en intérieur comme un système qui est capable de déterminer la position d'un équipement ou d'une personne de manière continue et en temps réel à l'intérieur d'un espace physique tel qu'un hôpital, une école, A partir de cette définition, un système de localisation en intérieur doit fonctionner tant que l'utilisateur ne l'éteint pas. Il doit estimer la position dans un délai maximum et doit couvrir la zone où l'utilisateur requiert la localisation.

Dans ce qui suit, nous présentons les principales techniques utilisées afin de localiser un objet d'intérêt dans les environnements externes ainsi que celles déployées dans les environnements internes.

1.3 Localisation dans les environnements externes

Nous distinguons principalement trois approches de localisation dans les environnements externes notamment la localisation basée sur les satellites, la localisation basée sur les réseaux cellulaires et la localisation associant les satellites et les réseaux cellulaires. Dans la première approche, l'objet d'intérêt est localisé à l'aide des signaux satellitaires, tel est le cas du système GPS. Dans la deuxième approche, la position de l'objet est estimée à partir des signaux qu'il reçoit du réseau GSM par exemple ou à partir du signal qu'il émet.

1.3.1 Le système GPS

Le système GPS est le système de géo-localisation le plus populaire fonctionnant au niveau mondial. Initialement conçu pour des applications militaires, ce système est devenu publique en 1990. Il permet une localisation en trois dimensions d'un objet sur le globe en mesurant les distances qui le séparent des satellites GPS. Ces distances sont calculées à partir de la mesure des temps d'arrivée des signaux émis des satellites GPS à

l'objet. La mesure du temps d'arrivée est effectuée en comparant l'heure d'émission, qui est incluse dans le signal, à l'heure de son arrivée. L'objet d'intérêt se situe à l'intersection des sphères de rayon égal à la distance qui le sépare du satellite.

Le système GPS comporte trois parties appelées segments : Le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur. Le premier segment est composé de 30 satellites évoluant sur 6 plans orbitaux quasi circulaires. Le deuxième segment, constitué de cinq stations au sol, permet le contrôle du bon fonctionnement du système et la mise à jour des informations des satellites telles que les paramètres d'horloge. Le dernier segment comporte l'ensemble des récepteurs GPS qui exploitent, après réception, les informations en provenance des satellites.

Le GPS permet une très bonne précision de localisation dans les environnements extérieurs. Toutefois, il est inefficace à l'intérieur, dans les environnements urbains, à proximité de murs et des bâtiments et dans les environnements souterrains, vu que le signal des satellites GPS est trop faible pour pouvoir passer à travers la plupart des bâtiments et que des obstacles sont présents dans la ligne de vue entre les satellites et le récepteur.

1.3.2 Les réseaux cellulaires

La méthode la plus simple de localisation cellulaire est la méthode de Cell-ID. Elle identifie d'abord la cellule dans laquelle se trouve l'objet d'intérêt puis, estime sa position par la station de base contrôlant la cellule. La précision de cette méthode dépend de la dimension des cellules.

La méthode O-TDOA mesure la différence de temps d'arrivée des signaux émis par au moins trois stations de base au niveau de l'objet. La position de l'objet se situe à l'intersection des hyperboles résultantes de ces mesures.

Il existe d'autres méthodes qui reposent sur la mesure de l'atténuation du signal ou des angles d'arrivées. Ces méthodes seront présentées dans le cas de la localisation en intérieur.

Toutes ces méthodes présentent de bonnes performances dans les environnements externes grâce à la présence du trajet direct. Cependant, dans les environnements internes, leurs performances sont fortement dégradées. Comparé aux environnements externes, les environnements internes sont plus complexes à cause de leur configuration géométrique et la présence de trajets multiples.

1.4 Localisation dans les environnements internes

Plusieurs systèmes de localisation ont été développés afin d'estimer la position de l'objet d'intérêt dans les environnements internes. Les premiers systèmes se sont basés sur l'exploitation des ondes infrarouges. Bien qu'ils permettent une estimation très précise de la position, ces systèmes requièrent la présence d'un trajet direct entre les émetteurs et les récepteurs et nécessitent une infrastructure très coûteuse. Les systèmes de localisation par ondes radiofréquence présentent un coût plus faible dû au fait qu'ils bénéficient des infrastructures de communication existantes. Toutefois, leurs performances sont moins bonnes que celles des systèmes de localisation par ondes infrarouges. Une description des avantages et des inconvénients des différentes technologies concernant leur utilisation pour la localisation en intérieur sera présentée dans le paragraphe 1.4.5, ainsi que des exemples de quelques systèmes de localisation.

On s'intéresse, dans le cadre de cette thèse, aux systèmes de localisation par ondes sonores. Ces systèmes, comme la plupart des systèmes de localisation, extraient à partir du signal reçu des informations sur la position de l'objet, telles que le temps d'arrivée, la puissance du signal reçu et l'angle d'arrivée. Le signal reçu résulte de la propagation du signal émis à travers un canal de propagation. Ce dernier décrit alors les caractéristiques de la propagation des ondes acoustiques de l'émetteur au récepteur à l'intérieur d'un environnement donné.

1.4.1 Modèle du canal de propagation acoustique

La modélisation de la propagation du signal dans les environnements intérieurs s'avère difficile à cause des paramètres spécifiques à ce type d'environnement tels que la disposition des meubles et des objets et les différents matériaux de construction employés [8].

Le signal mesuré au niveau du récepteur résulte de la superposition des différentes répliques du signal émis dues à la réflexion, la diffraction et la diffusion de l'onde sur les différents obstacles présents dans l'environnement. Ces répliques dépendent de la géométrie de l'environnement, des obstacles et des caractéristiques des matériaux présents.

Pour modéliser le canal acoustique entre une source et un microphone situés à l'intérieur d'une salle, on peut distinguer trois méthodes notamment la méthode par résolution d'équation d'onde, les méthodes géométriques et les méthodes statistiques.

La résolution de l'équation de propagation d'onde permet d'obtenir la réponse impulsionnelle d'une salle. Toutefois, une solution analytique de cette équation ne peut être obtenue que dans les cas extrêmement simples tel qu'une salle rectangulaire à murs rigides. Par conséquent, des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis et la méthode des éléments de frontières sont souvent utilisées. Ces deux méthodes

discrétisent la géométrie et le champ défini sur cette géométrie en utilisant des éléments finis. Dans la méthode des éléments finis, l'espace est divisé en des éléments de volume, alors que, dans la méthode des éléments de frontière, la surface délimitant le volume est découpée en des éléments de surface. Dans les deux cas, la taille des éléments finis doit être choisie très inférieure à la longueur d'onde utilisée. Par conséquent, leur nombre, à hautes fréquences, devient très important entraînant ainsi une complexité de calcul très élevée. Dès lors, ces méthodes ne conviennent que pour les basses fréquences et pour des salles de petites dimensions.

Les méthodes statistiques telles que la méthode d'analyse statistique énergétique ont été largement utilisées dans le domaine de l'aérospatial, l'industrie automobile pour l'analyse de bruit haute-fréquence. Ces méthodes ne conviennent, cependant, pas pour des fins de localisation vu qu'elles ne modélisent pas le comportement temporel du champ sonore.

Les méthodes géométriques telles que la méthode de tracé de rayon et la méthode des images sources, sont les plus utilisées. La principale différence entre ces deux méthodes réside dans la manière dont les trajets de réflexion sont calculés. Dans la méthode du tracé de rayons, l'énergie sonore est supposée répartie en un certain nombre de rayons émis par une source sonore. Ces rayons se propagent dans l'espace et sont réfléchis de manière spéculaire lors de leur collision avec les parois de la salle (figure 1.1). Au niveau du récepteur, seulement les rayons qui le traversent sont pris en compte dans le calcul de l'énergie sonore reçue. La méthode de tracé de rayons n'est pas alors exhaustive contrairement, à la méthode des sources-images qui tient compte de tous les rayons émanant de la source et traversant le récepteur.

La méthode des sources-images repose sur le principe qui dit que si le champ sonore émis par une source est réfléchi par une surface rigide, ce champ réfléchi est égal au champ produit par l'image de la source par rapport à cette surface. Les images de la source modélisent les réflexions d'ordre 1 alors que les images des images de la source modélisent les réflexions d'ordre supérieur.

En utilisant la méthode des sources-images, Allen et Berkley ont développé une méthode efficace pour le calcul d'une réponse impulsionnelle modélisant le canal acoustique entre une source et un récepteur dans une salle rectangulaire. Pour expliquer cette méthode, considérons une source sonore et un microphone situés respectivement aux positions $r_s = [x_s, y_s, z_s]$ et $r_r = [x_r, y_r, z_r]$ à l'intérieur d'une salle de dimensions L_x , L_y et L_z . Les positions des images de la source, construites par symétrie par rapport aux murs à $x = 0$, $y = 0$ et $z = 0$ et calculées relativement à la position du microphone, sont données par :

$$R_p = [(1 - 2q) \times x_s - x_r, (1 - 2j) \times y_s - y_r, (1 - 2k) \times z_s - z_r] \quad (1.1)$$

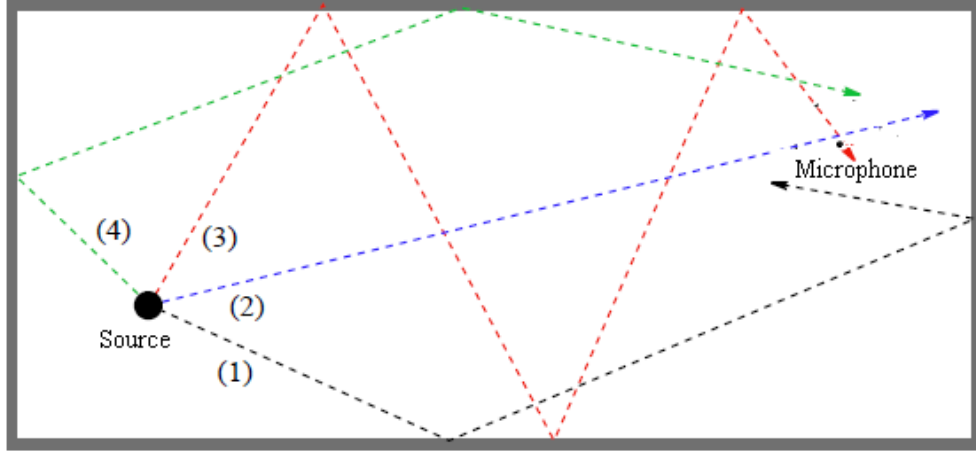


FIGURE 1.1: Méthode de tracé de rayons.

Chaque élément du triplet $p = (q, j, k)$ prend les valeurs 0 ou 1 générant ainsi huit différentes combinaisons que spécifie l'ensemble $P = \{(q, j, k); q, j, k \in \{0, 1\}\}$. Pour considérer toutes les images de la source, on ajoute au vecteur R_p le vecteur R_m défini par :

$$R_m = [2 \times m_x \times L_x, 2 \times m_y \times L_y, 2 \times m_z \times L_z] \quad (1.2)$$

Où m_x, m_y, m_z des entiers. Chaque élément du triplet $m = (m_x, m_y, m_z)$ prend les valeurs de $-I$ à I ; I étant entier. L'ordre de réflexion relatif à une image située à la position $r + R_p + R_m$ est donné par :

$$O_{p,m} = |2 \times m_x - q| + |2 \times m_y - j| + |2 \times m_z - k| \quad (1.3)$$

Le retard τ du trajet réfléchi s'exprime par :

$$\tau = \frac{d}{v}, \quad (1.4)$$

$d = \|R_p + R_r\|$ étant la longueur du trajet réfléchi et v la vitesse du son.

Le modèle d'Allen et Berkley proposé dans [9] exprime la réponse impulsionnelle d'une salle à murs non rigides sous la forme suivante :

$$h(r_s, r_r, t) = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \beta_{x_1}^{m_x - q} \beta_{x_2}^{m_x} \beta_{y_1}^{m_y - j} \beta_{y_2}^{m_y} \beta_{z_1}^{m_z - k} \beta_{z_2}^{m_z} \frac{\delta(t - \tau)}{4\pi d} \quad (1.5)$$

où $M = \{(m_x, m_y, m_z) : -I \leq m_x, m_y, m_z \leq I\}$. Les quantités $\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \beta_{y_1}, \beta_{y_2}, \beta_{z_1}$ et β_{z_2} désignent les coefficients de réflexion des six murs de la salle. Notons que les coefficients des murs à $\nu = 0$ où $\nu \in \{x, y, z\}$ correspondent à β_{ν_1} et que ceux des murs à $\nu = L_\nu$ correspondent à β_{ν_2} . Les éléments du triplet p prennent les valeurs 0 et 1 générant huit combinaisons de (0, 0, 0) à (1, 1, 1). Les éléments du triplet m prennent les

valeurs de $-I$ à I , entraînant $(2 \times I + 1)^3$ combinaisons. Pour une valeur donnée de I , la méthode calcule $8 \times (2 \times I + 1)^3$ différents trajets dont le retard est donné dans l'équation 1.4. Leurs amplitudes sont multipliées par les coefficients de réflexion autant de fois qu'il y a réflexions.

1.4.2 Paramètres du canal utiles à la localisation

Nous décrivons, dans les paragraphes suivants, les différents paramètres du canal permettant d'obtenir les mesures de distance et de directions nécessaires pour l'estimation de la position de l'objet.

1.4.2.1 Le temps d'arrivée (ou ToA pour Time of Arrival)

La distance entre l'objet d'intérêt et l'élément de mesure peut être déduite à partir de la mesure du temps de propagation du signal connaissant sa vitesse de propagation. Trois mesures de temps de propagation sont nécessaires pour une localisation en deux dimensions.

Le temps de propagation peut être estimé à partir de l'inter-corrélation entre le signal émis et le signal reçu au niveau de l'élément de mesure. Supposons que le signal $R_i(t)$, reçu au niveau de l'élément de mesure i , correspond à une version du signal émis $S(t)$ retardée de t_i et bruitée par $n_i(t)$:

$$R_i(t) = S(t - t_i) + n_i(t), \quad (1.6)$$

La fonction d'inter-corrélation entre $S(t)$ et $R_i(t)$ est obtenue en intégrant le produit de ces signaux sur une période de temps T_t :

$$R_{S,R_i}(\tau) = \frac{1}{T_t} \int_0^1 S(t) \times R_i(t - \tau) dt \quad (1.7)$$

Un estimé de TOA est donné par la valeur de τ qui maximise la fonction d'inter-corrélation $R_{S,R_i}(\tau)$. Cette méthode d'estimation de TOA sera utilisée dans le chapitre 2, dédié à l'évaluation de performance d'un nouveau système de localisation acoustique.

L'approche de localisation ainsi présentée requière une synchronisation parfaite entre les émetteurs et les récepteurs du système et suppose que la propagation se fait en ligne directe.

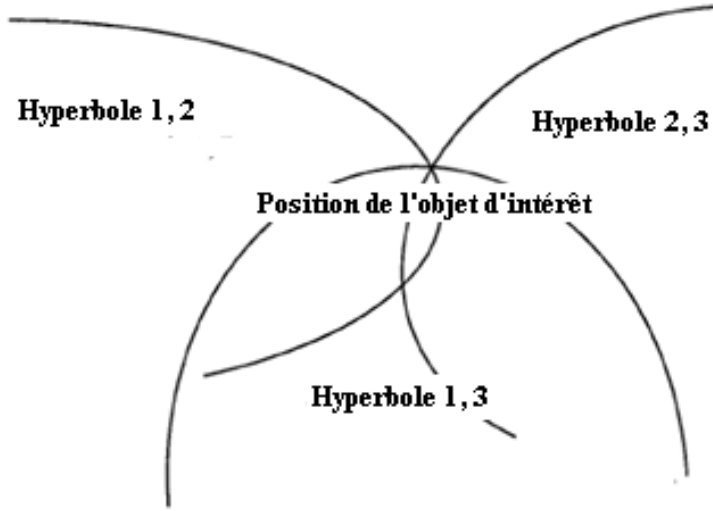


FIGURE 1.2: Méthode des hyperboles.

1.4.2.2 La différence de temps d'arrivée (ou TDoA pour Time Difference of Arrival)

Cette approche consiste à déterminer la position l'objet d'intérêt en examinant la différence des temps d'arrivée des signaux sur les éléments de mesure. Considérons trois éléments de mesure désignés par 1, 2 et 3, la différence de temps d'arrivée entre chaque paire de ces éléments est donnée par :

$$t_{i,j} = t_i - t_j \quad \text{pour} \quad i \neq j, \quad i, j \in \{1, 2, 3\} \quad (1.8)$$

La différence de distances séparant l'objet d'intérêt de chaque paire des éléments de mesure i et j est déduite à partir de $t_{i,j}$:

$$v \times t_{i,j} = \sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 + (z_i - c_z)^2} - \sqrt{(x_j - c_x)^2 + (y_j - c_y)^2 + (z_j - c_z)^2} \quad (1.9)$$

Où v la vitesse de propagation du signal, (x_i, y_i, z_i) et (x_j, y_j, z_j) les positions des éléments de mesure i et j et (c_x, c_y, c_z) la position de l'objet.

L'équation 1.9 correspond à l'équation d'une hyperbole. La position de l'objet se situe alors à l'intersection des trois hyperboles formées à partir des mesures de TDOA, $t_{(i,j)_{i \neq j, i, j \in \{1, 2, 3\}}}$ (voir figure 1.2).

La méthode conventionnelle du calcul de l'estimé de TDOA est la méthode de corrélation. La TDOA peut être estimée à partir de l'inter-corrélation entre les signaux reçus au niveau d'une paire des éléments de mesure. Supposons que les signaux $R_i(t)$ et $R_j(t)$ reçus respectivement aux niveaux des éléments de mesure i et j , s'écrivent comme

suit :

$$R_i(t) = S(t - t_i) + n_i(t), \quad (1.10)$$

et

$$R_j(t) = S(t - t_j) + n_j(t), \quad (1.11)$$

avec $S(t)$ le signal émis, t_i et t_j les retards du canal et $n_i(t)$ et $n_j(t)$ des variables aléatoires modélisant le bruit du canal.

La fonction d'inter-corrélation entre $R_i(t)$ et $R_j(t)$ s'exprime par :

$$R_{R_i, R_j}(\tau) = \frac{1}{T_t} \int_0^1 R_i(t) \times R_j(t - \tau) dt \quad (1.12)$$

La valeur de τ qui maximise la fonction d'inter-corrélation $R_{R_i, R_j}(\tau)$ correspond à un estimé de TDOA.

L'avantage de l'approche basée sur l'exploitation de TDOA par rapport à celle basée sur le TOA réside dans le fait qu'elle ne requiert pas une synchronisation entre tous les éléments du système mais seulement entre les récepteurs. Comme le TOA, le TDOA souffre des effets de trajets multiples dus à la présence des obstacles dans les environnements intérieurs.

1.4.2.3 Angle d'arrivée (ou AoA pour Angle of Arrival ou DoA pour Direction of Arrival)

Cette approche repose sur l'exploitation des angles d'arrivée du signal émis par l'objet d'intérêt aux niveaux des éléments de mesure. L'estimation des angles d'arrivée peut être accomplie par le biais des antennes directives. Celles-ci doivent tourner constamment afin de détecter la direction dans laquelle l'amplitude du signal est maximale. L'AoA peut également être détecté à partir de la mesure de la différence du délai d'arrivée du signal sur les éléments d'un réseau d'antennes.

Comparée aux approches basées sur l'exploitation de TOA et TDOA, l'approche de l'AoA n'exige aucune synchronisation entre les émetteurs et les récepteurs. Cependant, elle requiert une infrastructure relativement complexe et coûteuse à cause de l'emploi des antennes directives et des réseaux d'antennes. La précision de la localisation se dégrade lorsque l'objet s'éloigne des éléments de mesure. Par ailleurs, en présence des trajets multiples, la mesure d'AoA du signal sur le trajet direct est affectée par les AOAs des autres trajets.

1.4.2.4 Puissance du signal reçu

Dans le cas des approches basées sur l'exploitation de la puissance du signal reçu, la distance est évaluée à partir de l'atténuation de la puissance du signal émis. Des modèles théoriques et empiriques ont été utilisés afin de traduire la différence entre la puissance du signal émis et celle du signal reçu en distance. En utilisant la formule de Friis [10], la puissance du signal mesurée à une distance d et exprimée en dBm, est donnée par :

$$P_u(d)[dBm] = P_u(d_0)[dBm] - 10 \times n_0 \times \log_{10} \frac{d}{d_0} \quad (1.13)$$

Où $P_u(d)[dBm] = 10 \times \log_{10}(\frac{p_u}{0.001})$, p_u la puissance du signal exprimée en Watts, d la distance entre l'émetteur et le récepteur, n_0 le coefficient d'atténuation propre au milieu et $P_u(d_0)$ la puissance du signal mesurée à une distance de référence d_0 . La distance d peut alors être déduite en remplaçant tous les autres paramètres du modèle par leurs valeurs.

A cause des trajets multiples, les modèles reliant l'atténuation de la puissance du signal à la distance ne sont pas toujours vérifiés [8]. En effet, certains modèles ne tiennent pas compte des pertes dues aux trajets multiples et à l'absorption d'une partie de l'énergie par les différents matériaux présents dans le milieu de propagation. Toutefois, l'approche basée sur l'exploitation de la puissance du signal reçu est largement utilisée. D'une part, elle ne demande aucune synchronisation. D'autre part, elle bénéficie des infrastructures de réseaux existantes telles que les points d'accès des réseaux locaux sans fil (noté WLAN pour Wireless Local Area Network).

La puissance du signal reçu est très souvent utilisée avec la méthode des signatures. Cette méthode de localisation est présentée dans le paragraphe suivant.

1.4.3 Techniques de localisation

Des méthodes spécifiques exploitent les paramètres du canal, décrits dans le paragraphe précédent, afin de déterminer la position de l'objet. Globalement, il existe trois méthodes déployées pour localiser un objet dans les environnements intérieurs : la technique de proximité, la méthode de triangulation et la méthode des signatures [11].

1.4.3.1 La technique de proximité

La technique de proximité estime la position de l'objet d'intérêt par rapport à une position connue ou par rapport à une zone bien définie. Elle nécessite l'installation des détecteurs à des positions connues. Si l'objet d'intérêt est détecté par un détecteur, la méthode estime sa position par la zone de ce détecteur.

1.4.3.2 Méthode de triangulation

La triangulation utilise les propriétés géométriques des triangles pour estimer la position de l'objet d'intérêt. Elle comporte la méthode d'angulation et la latération.

La latération

La latération estime la position de l'objet à partir de la mesure des distances qui séparent l'objet des éléments de mesure. Elle requiert la connaissance des positions d'au moins trois éléments de mesure pour une localisation en deux dimensions. Dans le cas où la position de l'objet est estimée à partir de trois éléments de mesure, on parle de trilatération au lieu de la latération.

La position de l'objet peut être calculée en minimisant la somme des carrés des fonctions de coût non linéaires par application de la méthode des moindres carrés. Supposons que l'objet est situé à la position $c = (c_x, c_y, c_z)$ et que les J éléments de mesure sont placés à la même valeur de cote z et aux positions (x_1, y_1, z) , (x_2, y_2, z) , \dots , (x_J, y_J, z) . Les distances, $(d_i)_{i \in [1, J]}$, entre les J éléments de mesure et l'objet sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_1 - c_x)^2 + (y_1 - c_y)^2 + (z_1 - c_z)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 + (z_i - c_z)^2 = d_i^2 \\ \vdots \\ (x_J - c_x)^2 + (y_J - c_y)^2 + (z_J - c_z)^2 = d_J^2 \end{array} \right. \quad (1.14)$$

En soustrayant la dernière équation du système 1.14 des autres équations, le système d'équations non linéaires 1.14 devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1^2 - x_J^2 - 2 \times (x_1 - x_J) \times c_x + y_1^2 - y_J^2 - 2 \times (y_1 - y_J) \times c_y = d_1^2 - d_J^2 \\ \vdots \\ x_i^2 - x_J^2 - 2 \times (x_i - x_J) \times c_x + y_i^2 - y_J^2 - 2 \times (y_i - y_J) \times c_y = d_i^2 - d_J^2 \\ \vdots \\ x_{J-1}^2 - x_J^2 - 2 \times (x_{J-1} - x_J) \times c_x + y_{J-1}^2 - y_J^2 - 2 \times (y_{J-1} - y_J) \times c_y = d_{J-1}^2 - d_J^2 \end{array} \right. \quad (1.15)$$

Les équations linéaires données dans 1.15 peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$Xc = a \quad (1.16)$$

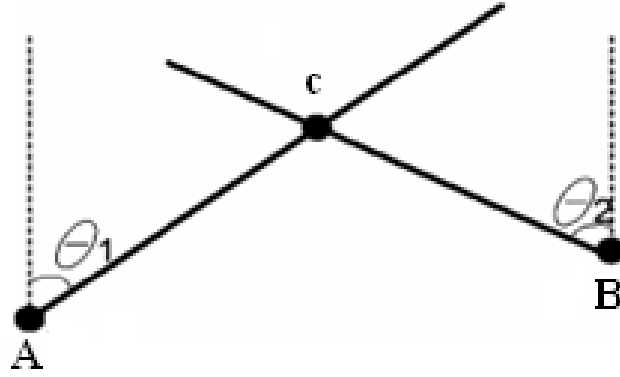


FIGURE 1.3: Localisation par la méthode d'angulation [8].

avec

$$X = \begin{pmatrix} 2 \times (x_1 - x_J) & 2 \times (y_1 - y_J) \\ \vdots & \vdots \\ 2 \times (x_{J-1} - x_J) & 2 \times (y_{J-1} - y_J) \end{pmatrix}$$

$$a = \begin{pmatrix} x_1^2 - x_J^2 + y_1^2 - y_J^2 - d_1^2 + d_J^2 \\ \vdots \\ x_{J-1}^2 - x_J^2 + y_{J-1}^2 - y_J^2 - d_{J-1}^2 + d_J^2 \end{pmatrix}$$

et

$$c = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix}$$

En utilisant la méthode des moindres carrées, un estimé de la position de l'objet est donné par :

$$\tilde{c} = (X^T X)^{-1} X^T a \quad (1.17)$$

X^T désigne la transposée de la matrice X .

L'angulation

L'angulation repose sur la mesure des angles pour le calcul de la position de l'objet. Elle nécessite au moins deux mesures d'angles et une mesure de distance entre deux éléments de mesure pour une localisation en deux dimensions. Une mesure supplémentaire d'élévation (ou en anglais azimuth angle) est nécessaire pour une localisation en trois dimensions. Cette méthode est illustrée dans la figure 1.3.

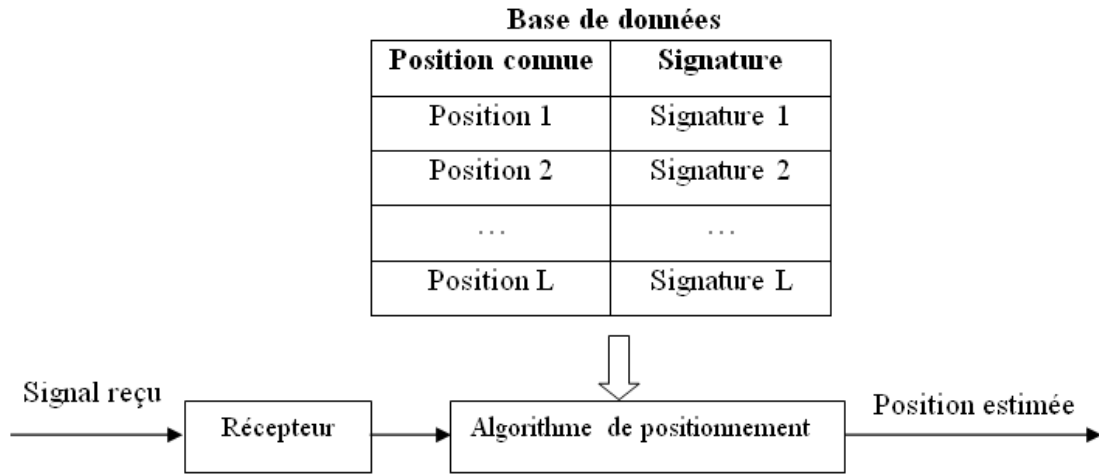


FIGURE 1.4: Méthode des signatures.

1.4.3.3 Méthode des signatures (ou méthode des empreintes digitales)

La méthode des signatures a été proposée afin d'améliorer l'estimation de la position dans les environnements intérieurs [12]. Elle compare des données de localisation préalablement mesurées à celles obtenues pour l'objet d'intérêt afin de déterminer sa position. La méthode comporte alors deux phases : une phase hors ligne (appelée aussi phase de calibrage ou apprentissage) et une phase en ligne (appelée aussi phase de positionnement ou localisation).

Durant la première phase, un maillage de la zone d'intérêt est effectué : le dispositif de positionnement est mis à des emplacements représentatifs pour les positions possibles de l'objet. A chaque emplacement (appelé position de référence), des paramètres du signal permettant d'identifier cette position sont extraits. Ces paramètres, appelés signatures ou empreintes, sont stockées dans une base de données avec les positions qui y correspondent. Le principal critère que doit vérifier une signature est l'unicité : Les signatures relatives à deux positions différentes doivent également être différentes.

Pendant la deuxième phase, la signature de l'objet est déterminée puis comparée aux signatures stockées dans la base de données, à l'aide d'un algorithme de positionnement, afin d'estimer sa position. Le principe de la méthode des signatures est donné dans la figure 1.4. Dans les paragraphes suivants, nous mettons l'accent sur les algorithmes de positionnement les plus couramment utilisés.

Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes ont été utilisées en premier par Bahl et Padmanabhan [13] pour réaliser leur système de localisation, RADAR. Le système collecte les puissances des signaux reçus, $s_1 = (P_{u_1}, P_{u_2}, P_{u_3})$, aux niveaux des trois points d'accès d'un réseau local sans fil et les stocke dans une base de données. Pendant la phase de localisation, il

calcule la distance euclidienne entre la signature de l'objet d'intérêt, $s = (P_{u_1}^0, P_{u_2}^0, P_{u_3}^0)$, et les signatures de la base de données :

$$D_{s_1, s} = \sqrt{(P_{u_1} - P_{u_1}^0)^2 + (P_{u_2} - P_{u_1}^0)^2 + (P_{u_3} - P_{u_3}^0)^2} \quad (1.18)$$

Il estime la position de l'objet par la position de référence pour laquelle cette distance est minimale. Cet algorithme est connu sous le nom de l'algorithme du voisin le plus proche. Bahl et al [13] ont considéré, ensuite, les k_v voisins les plus proches dans l'estimation de la position de l'objet d'intérêt. Ceci est justifié par le fait qu'il pourrait exister plusieurs positions de référence qui sont à une distance presque égale de l'objet d'intérêt. La position de l'objet (c_x, c_y) est alors donnée par la moyenne des positions des k_v voisins les plus proches :

$$\begin{cases} \tilde{c}_x = \frac{\sum_{i=1}^{k_v} x_{v,i}}{k_v} \\ \tilde{c}_y = \frac{\sum_{i=1}^{k_v} y_{v,i}}{k_v} \end{cases} \quad (1.19)$$

où $(x_{v,i}, y_{v,i})$ la position du voisin i .

Méthodes probabilistes

Supposons que nous disposons d'une base de données composée de L données (c_l, s_l) ; $l = 1, \dots, L$; où c_l désigne une position de référence et s_l sa signature. La position c de l'objet d'intérêt peut être estimée par la position de référence qui maximise la probabilité $P(c_l|s)$:

$$\tilde{c} = \operatorname{argmax}_{c_l} P(c_l|s); \quad l = 1, \dots, L. \quad (1.20)$$

où $P(c_l|s)$ désigne la probabilité d'être à la position c_l sachant s et s la signature de l'objet d'intérêt. En se basant sur la règle de Bayes et en supposant que la probabilité a priori, $P(c_l)$, d'être à la position c_l avant de connaître s est uniforme, la position de l'objet est alors donnée par :

$$\tilde{c} = \operatorname{argmax}_{c_l} P(s|c_l); \quad l = 1, \dots, L. \quad (1.21)$$

où $P(s|c_l)$ désigne la probabilité d'avoir s sachant c_l . Cette méthode suppose que l'objet d'intérêt est situé sur l'une des positions de référence stockées dans la base de données. Cependant, l'objet peut se trouver à une position quelconque dans la zone de localisation. Il existe d'autres méthodes probabilistes qui estiment la position de l'objet par la moyenne pondérée des coordonnées des positions de référence. Elles reposent sur l'estimation de l'espérance conditionnelle $E(c|s)$ par la méthode de noyau. Ces méthodes seront présentées dans le chapitre 2.

Réseaux de neurones artificiels

Le réseau de neurones artificiels présente une structure mathématique capable d'effectuer des opérations de calcul complexes telles que la classification et l'approximation des fonctions. Afin de réaliser ces tâches, le réseau doit être entraîné à partir de deux ensembles d'éléments : Le premier ensemble correspond aux éléments d'entrées possibles. Le deuxième ensemble comporte les sorties correspondantes. Une fois entraîné, le réseau est capable d'estimer la sortie à partir de toute entrée, qu'elle soit vue auparavant ou non.

Appliqué au contexte de la localisation, le réseau est entraîné à partir des données recueillies par les campagnes de mesures : Les signatures de la base de données représentent les entrées du réseau et les positions correspondantes à ces signatures représentent ses sorties. Après entraînement (i.e., après approximation de la fonction entre les signatures et les positions), le réseau est utilisé pendant la phase de localisation afin d'estimer la position de l'objet à partir de sa signature.

Dans le cadre de cette thèse, nous déployons, dans un premier temps, la méthode des signatures et nous adoptons les méthodes probabilistes afin d'estimer la position de l'objet à l'intérieur d'une salle. Ce double choix est justifié par le fait que la méthode des signatures est plus adaptée aux environnements internes que la méthode de triangulation et que les méthodes probabilistes offrent des performances meilleures que celles obtenues avec les méthodes déterministes [14] et qu'elles ne requièrent aucune phase d'entraînement comme c'est le cas du réseau de neurones artificiels. Une évaluation de la méthode des signatures en termes d'erreur et de précision de localisation, critères d'évaluation des systèmes de localisation décrits dans le prochain paragraphe, sera présentée dans le chapitre 2.

L'inconvénient majeur de la méthode des signatures est lié à la construction de la base de données ainsi que le temps mis pour cette construction et la mémoire requise pour l'enregistrement de la base de données. Il existe d'autres méthodes plus robustes à l'effet des trajets multiples telles que la méthode de retournement temporel qui ne requière pas la construction d'une base de données. Cette méthode sera traitée en détails dans les chapitre 3 et chapitre 4.

1.4.4 Critères d'évaluation des systèmes de localisation en intérieur

Pour évaluer les systèmes de localisation, différents critères sont proposés. Nous mettons l'accent dans ce paragraphe sur quelques critères.

1.4.4.1 Respect de la vie privée (ou en anglais *Security and privacy*)

Le respect de la vie privée constitue un des enjeux les plus importants pour les systèmes de localisation. En effet, l'utilisateur se soucie si quelqu'un suit son déplacement ou récupère l'historique de ses activités.

Le contrôle d'accès aux données de localisation ainsi que leurs distributions améliorent le respect de la vie privée dans les systèmes de localisation. Des améliorations peuvent également être réalisées à travers l'architecture du système [15]. En effet, les systèmes de localisation en intérieur présentent deux architectures principales : une architecture orientée privée et une architecture centralisée.

Les systèmes à architecture orientée privée doivent vérifier deux propriétés. Premièrement, l'objet d'intérêt n'a pas besoin d'informer les composants du système de sa présence. Deuxièmement, les composants du système ne se chargent pas de l'estimation de la position de l'objet. Par conséquent, l'objet d'intérêt calcule sa position par lui-même. Les systèmes à architecture orientée privée permettent alors un niveau élevé de sécurité et du respect de la vie privée de leurs utilisateurs : Tant que l'utilisateur ne transmet pas sa position, personne ne peut y accéder.

Dans les systèmes à architecture centralisée, un serveur central se charge de l'estimation des positions des objets d'intérêt. Ceci permet aux systèmes de localisation de suivre les déplacements des objets dès que ces derniers se situent dans leurs zones de couverture. Les objets sont alors localisés sans leurs autorisations.

1.4.4.2 Coût

Le coût d'un système de positionnement comporte le coût des composants du système, le coût de l'équipement de positionnement déployé par l'utilisateur et le coût de l'installation du système et de sa maintenance.

Quelques systèmes de positionnement, tels que le GPS, dispose d'une large infrastructure pour la mesure des positions, ce qui est coûteux et complexe. D'autres réutilisant les infrastructures de réseaux existantes telles que celles des réseaux locaux sans fil sont plus rentables, puisqu'aucun coût supplémentaire ne sera ajouté.

Le coût du dispositif de positionnement déployé par l'utilisateur comporte le coût de l'appareil ainsi que le coût de la batterie et sa durée de vie. Les dispositifs déployés dans les systèmes à architecture orientée privée sont préférés puisqu'ils assurent le respect de la vie privée des utilisateurs. Ceci augmente leur prix mais, réduit la durée de vie de leurs batteries vu que le calcul de la position est effectué à leurs niveaux.

Quelques systèmes de positionnement requièrent l'installation d'une infrastructure supplémentaire et d'autres nécessitent l'intervention des ingénieurs professionnels ce qui augmente leur coût d'installation et de maintenance.

D'autre part, le coût d'un système de positionnement peut être adressé différemment : Le coût en termes de temps et le coût en termes de l'espace. Le coût en termes de temps comporte le temps requis pour l'installation du système. Le coût en termes de l'espace comprend la taille et la place qu'occupent les composants du système et le dispositif de l'utilisateur.

1.4.4.3 Performance

L'erreur de localisation et la précision (ou en anglais, *accuracy and precision*) sont les principaux critères d'évaluation des performances d'un système de localisation.

Erreur de localisation

On appelle *Erreur de localisation* la distance entre la position réelle de l'objet à localiser et sa position estimée. Supposons que c_x et c_y sont les coordonnées réelles de l'objet et \tilde{c}_x et \tilde{c}_y ses coordonnées estimées, l'erreur de localisation s'exprime par :

$$\text{erreur de localisation} = \sqrt{((c_x - \tilde{c}_x)^2 + (c_y - \tilde{c}_y)^2)} \quad (1.22)$$

Précision

On appelle *Précision* (ou en anglais *Precision*) la fonction de distribution cumulative, qui à chaque valeur d'erreur de localisation e , associe le pourcentage des mesures ayant au moins e pour erreur.

Délai (ou en anglais *delay*)

Le délai présente un autre aspect d'évaluation de performances d'un système de localisation. Il comporte le temps de mesure, de calcul de la position de l'objet et de transfert de la position aux entités qui le demandent.

'Scalability'

La 'scalability' est définie comme le nombre des objets qu'un système de positionnement est capable de localiser pendant une certaine durée de temps et avec un certain nombre de composants du système. Un système localisant simultanément plusieurs objets est préféré.

1.4.4.4 Complexité

La complexité d'un système de positionnement peut être caractérisée par l'intervention humaine nécessaire pour son installation et sa maintenance. Pour l'installation, une mise en place rapide du système et un faible nombre de ses composants fixes sont requis.

1.4.5 Technologies et systèmes de localisation

Différentes technologies ont été déployées dans les systèmes de localisation destinés aux environnements intérieurs. Ces technologies comprennent l'infrarouge, l'ultrason, la radiofréquence. Elles ont, chacune leurs propres avantages et leurs propres limitations concernant leur utilisation pour la localisation en intérieur. Une classification des systèmes de localisation peut être faite à partir de la technologie utilisée.

1.4.5.1 Systèmes de localisation par ondes infrarouges

Les Systèmes de localisation par ondes infrarouges sont les premiers systèmes de localisation qui ont été développés pour les environnements intérieurs. Ils permettent une estimation très précise de la position. Par ailleurs, leur simple architecture réduit le temps de leur installation et de leur maintenance.

Toutefois, les signaux infrarouges présentent quelques limitations pour la localisation. D'abord, ces signaux interfèrent avec la lumière fluorescente et la lumière du soleil [16], ce qui réduit la portée permise des systèmes de localisation à une salle. Ce problème d'interférence peut être résolu par l'utilisation des filtres optiques et électroniques permettant de supprimer l'interférence avec les sources de lumière [17], et par la mise en œuvre d'un algorithme d'annulation de bruit aux niveaux des récepteurs [18], mais, ce est aux dépens d'une augmentation du coût du système de localisation. Par ailleurs, les signaux infrarouges sont fortement atténués par les murs et les obstacles présents dans les environnements internes. Par conséquent, les systèmes de localisation par ondes infrarouges n'opèrent plus en absence d'une ligne de vue directe.

L'Active Badge [19], conçu à AT & T Cambridge, est l'un des premiers systèmes de positionnement à étiquettes opérant à l'intérieur des bâtiments. Une étiquette, portée par l'utilisateur, transmet un signal infrarouge unique toutes les 15 secondes. Ces signaux sont détectés par des capteurs fixés à l'intérieur de la zone de la localisation telle qu'une salle, puis, traités par un serveur central afin de localiser l'étiquette : Le système identifie la pièce dans laquelle se trouve la personne porteuse de l'étiquette. A partir de cette information, quelques applications ont été conçues. Par exemple, une application destinée à aider un réceptionniste à transférer les appels téléphoniques aux employés

d'une entreprise a été proposée dans [19]. L'application affiche sur l'écran de l'ordinateur du réceptionniste un tableau contenant les noms des employés, leurs positions mesurées à l'intérieur de l'entreprise ainsi que l'appareil téléphonique qui leur est le plus proche. La position de l'employé correspond au numéro de la salle dans laquelle il se trouve. Dès lors, à partir des informations fournies par l'application, le réceptionniste, transfère l'appel à l'employé concerné.

Il existe d'autres systèmes de localisation qui déploient des caméras afin de détecter les signaux infrarouges. Ces systèmes atteignent une précision de localisation submillimétrique. Cependant, ils présentent un coût très élevé à cause des caméras déployés et des câbles qui les relient.

1.4.5.2 Systèmes de localisation par ondes ultrasonores

Les signaux ultrasonores sont utilisés par les chauves-souris afin de naviguer la nuit. Ceci a inspiré les chercheurs à concevoir un système de navigation similaire.

Comparé aux systèmes de localisation par ondes infrarouges, les systèmes de localisation par ondes ultrasonores offrent une zone de couverture plus large. Cependant, ils permettent une précision de localisation moins bonne. Ils déploient généralement, en plus des ondes ultrasonores, des signaux radio afin d'assurer la synchronisation. Par ailleurs, ils sont affectés par les réflexions et par les sources de bruit.

Le système DOLPHIN [20] est le premier système de localisation ultrasonore utilisant des signaux large bandes. Il déploie la technique de multiplexage à étalement de spectre afin d'obtenir une mesure simultanée des distances entre l'objet d'intérêt et les éléments de mesure. Deux architectures sont proposées : l'architecture centralisée et l'architecture orientée-privée.

Le système à architecture centralisée utilise huit récepteurs fixés au plafond et quatre émetteurs placés à des positions fixes dans la salle où l'expérimentation a eu lieu. L'objet d'intérêt, placé à 64 positions, émet un code de Gold de longueur 511 chips modulé en phase. Le système utilise un détecteur à soustraction successive d'interférence afin de réduire l'interférence entre les différents émetteurs. Il mesure les temps d'arrivée en effectuant une corrélation entre les signaux reçus et le signal émis par l'objet et estime la position de ce dernier par la méthode de la latération. Les résultats des expérimentations effectuées dans un banc d'essai de dimensions $3.5 \text{ m} \times 2.6 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ montrent que le système permet une erreur de 2.3 cm pour 85% des mesures considérées.

Le système à architecture orientée privée comporte huit émetteurs placés au plafond et un récepteur placé aux mêmes 64 positions définies dans le système à architecture centralisée. Il propose deux approches : une approche synchrone et une approche asynchrone. Dans l'approche asynchrone, le récepteur et les émetteurs ne sont pas synchronisés. La

mesure de temps d'arrivée inclut un offset identique due à la synchronisation entre les émetteurs. Sa valeur doit être estimée en plus de la position du récepteur. Le système permet une erreur de 4.9 cm pour 67% des mesures considérées dans le cas synchrone, alors que, dans le cas asynchrone, il atteint une erreur de 26.6 cm pour 48% des mesures considérées.

Un système de localisation plus récent, connu sous le nom de 3D-Locus, a été décrit dans [21]. Le système comporte sept nœuds fixes orientés vers le bas, un nœud orienté vers le haut et un nœud sans fil, représentant l'objet d'intérêt, orienté vers le haut. Le système déploie des codes de Golay de 32 chips modulé en phase et mesure le temps d'arrivée par corrélation entre les signaux reçus et les signaux émis. Il estime la position de l'objet d'intérêt en minimisant la somme des carrés de la différence entre la distance calculée à partir de la mesure de temps d'arrivée et la distance euclidienne entre l'objet et les nœuds fixes. Trois architectures du système sont proposées : un système à architecture centralisée, un système à architecture orientée privée et un système à architecture bidirectionnelle. Dans le système à architecture centralisée, les nœuds orientés vers le bas reçoivent les signaux émis par les nœuds orientés vers le haut. Dans le système à architecture orientée privée, les ondes ultrasonores se propagent dans une direction opposée à celle du premier système. L'objet d'intérêt se comporte alors comme émetteur dans la première architecture et comme récepteur dans la deuxième architecture. Dans le système à architecture bidirectionnelle, le système déploie l'architecture centralisée et l'architecture orientée privée de manière séquentielle et estime la position de l'objet par la moyenne des positions estimées dans chaque architecture. Pour évaluer les performances de leur système, Prieto et al. [21] ont considéré les quatre conditions de test suivantes : La méthode d'accès multiple à répartition dans le temps (ou encore TDMA pour Time Division Multiple Access), la méthode d'accès multiple à répartition par code (ou encore CDMA pour Code Division Multiple Access) et chacune de ces conditions de test en considérant un flux d'air à une vitesse de 2 m/s, résultant de l'emploi d'un ventilateur. La méthode TDMA consiste à assigner à chaque émetteur un intervalle de temps au cours duquel il transmet son signal. La méthode CDMA permet de différencier les émetteurs par l'utilisation des codes 'orthogonaux' entre eux.

Pour la méthode CDMA, le système a déployé au maximum quatre émetteurs. Les mesures obtenues avec cette technique sont dégradées par l'interférence d'accès multiple et par l'effet d'éblouissement. Pour remédier à l'effet d'éblouissement, qui est dû à la différence de puissance des signaux reçus, Prieto et al. [21] ont réajusté la puissance émise en chaque point. Les résultats des expérimentations menées dans un banc d'essai de dimensions 2.8 m \times 2.8 m \times 2.8 m ont montré que les performances les plus médiocres sont obtenues avec la méthode CDMA et en présence du ventilateur. L'erreur de localisation obtenue avec les différentes architectures du système et les différentes conditions de test

varie de 2.8 mm à 10.7 mm.

1.4.5.3 Systèmes de localisation par ondes radiofréquences

La technologie radio permet aux systèmes de localisation de tirer parti de ses avantages. En effet, les systèmes de localisation par ondes radiofréquences offre une couverture plus large grâce à la capacité des ondes radio à passer à travers les murs. Par ailleurs, ils nécessitent moins de matériel, comparé aux autres systèmes de localisation, du fait qu'ils peuvent profiter des infrastructures de communication existantes, comme par exemple, les points d'accès des réseaux locaux sans fil, WLAN.

Les technologies radiofréquences sont divisées en deux catégories : Les technologies à bande étroite telles que la radio-identification (ou en anglais RFID pour Radio Frequency IDentification), bluetooth et WLAN et les technologies à large bande comme l'Ultra-Large Bande (ou en anglais UWB pour Ultra-Wide Band).

RFID [8]

La radio-identification est une méthode permettant de mémoriser et récupérer des données à distance en exploitant des 'étiquettes radio'. Un système RFID se compose principalement d'étiquettes RFID et de lecteurs d'étiquettes RFID. Les étiquettes présentent deux types : passives ou actives. Les étiquettes passives ne disposent pas de batterie et sont excitées par le signal électromagnétique émis par le lecteur. Elles sont principalement utilisées pour remplacer la technologie traditionnelle du code à barres et elles sont plus petites et moins chères que les étiquettes actives. Ces dernières disposant d'une source d'énergie envoient activement leurs identifications. On distingue deux méthodes de localisation par la méthode RFID : une méthode de localisation de lecteur RFID et une méthode de localisation d'étiquette. Dans la première méthode, l'objet d'intérêt porteur d'un lecteur RFID détermine sa position grâce à un ensemble d'étiquettes placées à des positions connues. Dans la deuxième méthode, la position de l'étiquette attachée à l'objet d'intérêt est déterminée par un ensemble de lecteurs à des positions connues.

WLAN [12]

La technologie WLAN a été déployée dans plusieurs zones publiques telles que les hôpitaux, les universités, les stations de train. Dès lors, les systèmes de positionnement en intérieur peuvent profiter des infrastructures WLAN existantes réduisant ainsi le coût de positionnement.

La précision de localisation basée sur la puissance des signaux WLAN est affectée par différents éléments qui pourraient exister dans les environnements intérieurs tels que le mouvement des individus, les murs, les portes.

ZigBee [11]

La technologie ZigBee est une norme de technologie sans fil émergente qui fournit une solution pour les communications sans fil à courte et moyenne portée. Elle est principalement conçue pour des applications qui nécessitent une faible consommation d'énergie, mais qui ne requièrent pas un débit élevé de données. La portée d'un signal ZigBee dans les environnements intérieurs est généralement de 20 m à 30 m. Le calcul de la distance entre deux nœuds ZigBee, utile pour la localisation, est généralement effectué à partir des valeurs de la puissance de signal reçu. Le signal ZigBee est susceptible d'interférer avec plusieurs types de signaux utilisant la même fréquence vu qu'elle fonctionne dans les bandes ISM (industriel, scientifique, et médical) non licenciées.

UWB [11]

La technologie Ultra-Large Bande est basée sur la transmission des impulsions très brèves (typiquement inférieures à 1 ns). Contrairement aux systèmes RFID qui déploient une seule bande du spectre radio, l'Ultra-Large Bande transmet simultanément le signal sur plusieurs bandes de fréquences de 3.1 à 10.6 GHz. La technologie Ultra-Large Bande est utilisée dans une variété d'applications de localisation nécessitant une précision de localisation meilleure que celle atteinte par les technologies sans fil conventionnelles comme le RFID et le WLAN.

Le système de positionnement en intérieur, RADAR [13], proposé par Microsoft Research Group est le premier système de localisation par ondes radio-fréquences basé sur la puissance du signal et la technologie sans fil. Le système repose sur la méthode des signatures et adopte la puissance du signal reçu aux niveaux des trois points d'accès du réseau local sans fil comme signature. Il estime la position de l'objet d'intérêt en comparant sa signature avec celles stockées dans la base de données à l'aide de la méthode des k_v -voisins les plus proches. Deux méthodes de construction de la base de données sont proposées. La première revient à mesurer la puissance du signal reçu à différentes positions du banc d'essai. La deuxième méthode calcule la puissance du signal à l'aide d'un modèle de propagation inspiré du modèle '*Floor attenuation factor model*' [22] et donné par :

$$P(d)[dBm] = \begin{cases} P(d_0)[dBm] - 10 \times n_0 \times \log_{10} \frac{d}{d_0} - nW \times WAF & \text{si } nW < C_m \\ C_m \times WAF & \text{si } nW \geq C_m \end{cases} \quad (1.23)$$

où nW le nombre de murs entre l'émetteur et le récepteur, WAF le facteur d'atténuation des murs, n_0 le facteur d'atténuation propre au milieu, $P(d_0)$ la puissance du signal mesurée à une distance de référence d_0 et C_m le nombre maximal de murs pris en compte dans le modèle.

Le nombre de murs, nW , est déterminé par l'algorithme 'Cohen-Sutherland line-clipping algorithm' [23] connaissant les positions des points d'accès du réseau et les coordonnées

des salles dans l'étage où l'expérimentation a eu lieu. Pour déterminer la valeur du facteur *WAF*, Bahl et al [13] ont mesuré la puissance du signal reçu en faisant varier le nombre de murs entre l'émetteur et le récepteur. Puis, ils ont calculé la moyenne de la différence entre les valeurs de puissance ainsi mesurées.

Pour évaluer les performances de leur système, les auteurs ont mené des expérimentations dans un étage de dimensions 43.5 m × 22.5 m et contenant plus de 50 salles. Les résultats ont montré que le système permet une erreur de 2.94 m pour 50% des mesures avec la première méthode, alors qu'avec la deuxième méthode, il atteint une erreur de 4.3 m.

Le majeur avantage du système RADAR est qu'il bénéficie des infrastructures existantes des réseaux WLAN. En revanche, le respect de la vie privée de l'utilisateur n'a pas été pris en considération dans la conception de ce système : L'utilisateur mené de son dispositif de positionnement, qui est équipé par la technologie WLAN, peut être suivi même s'il ne le souhaite pas.

Dans [24], un système de localisation à l'intérieur des mines a été proposé. Le système repose sur la méthode des signatures et déploie deux récepteurs placés à des positions fixes. Il extrait sept paramètres de la réponse impulsionnelle du canal dont le retard moyen, la puissance du signal reçu, le nombre de trajets afin de définir la signature de l'objet d'intérêt et estime la position de ce dernier en une seule dimension à l'aide des réseaux de neurones artificiels. Deux approches de localisation sont possibles. La première approche utilise deux réseaux de neurones constitués chacun de sept entrées et d'une sortie. Les entrées correspondent aux sept éléments de la signature et la sortie correspond à la distance entre l'émetteur et l'un des deux récepteurs. La position estimée de l'objet est alors la moyenne des distances estimées par les deux réseaux de neurones. La deuxième approche déploie un seul réseau de neurones regroupant à son entrée les deux signatures de l'objet. La position de l'objet est donnée par rapport à la distance qui le sépare de l'un des deux récepteurs. Les campagnes de mesure effectuées dans la mine laboratoire CANMET à la ville Val-d'Or [25] ont montré que le système permet une erreur de 1 m pour 90% des nouvelles entrées non entraînées, et ce en utilisant un seul réseau de neurones.

Dans [26], un système de localisation basé sur la technique des signatures et utilisant les réseaux de neurones artificiels a été présenté. Les auteurs ont proposé une solution afin de limiter les erreurs de localisation causées par la variation du signal radiofréquence. Moreno-Cano et al [26] ont d'abord mené une étude théorique et effectué des simulations afin d'analyser la distribution de la puissance de signal radiofréquence dans les environnements internes. A la suite de cette étude, les auteurs ont proposé de combiner la technologie radiofréquence avec la technologie infrarouge afin de résoudre le problème de la variabilité de la puissance dans les environnements internes. Les auteurs ont alors découpé la zone d'intérêt en des sous-zones caractérisées par une distribution

de puissance uniforme. Chaque sous-zone comporte un émetteur infrarouge permettant de l'identifier et des étiquettes RFID utiles pour la localisation de l'objet d'intérêt à l'intérieur de cette sous-zone. Les étiquettes, comportant un capteur infrarouge alimenté par l'émetteur infrarouge, communiquent avec un lecteur RFID situé à proximité.

Le procédé de la localisation se présente comme suit : le lecteur RFID reçoit de la part des étiquettes RFID un vecteur de données contenant l'identifiant de l'émetteur infrarouge, lu par l'étiquette, ainsi que l'identifiant de cette dernière. En outre, le lecteur fournit la valeur de la puissance du signal reçu relative à cette étiquette. Les valeurs de puissance des différentes étiquettes d'une sous-zone donnée ainsi que leurs positions sont ensuite employées afin d'entraîner le réseau de neurones artificiels. Pendant la phase de localisation, le système détermine d'abord la sous-zone dans laquelle se trouve l'étiquette portée par l'objet d'intérêt en se basant sur la valeur de l'identifiant de l'émetteur infrarouge. Etant donné la valeur de la puissance du signal émis par l'objet d'intérêt, la position de ce dernier est estimée à l'aide du réseau de neurones relatif à la sous-zone considérée.

Pour évaluer les performances de leur système, les auteurs ont mené des expérimentations dans le centre de transfert technologique à l'université de Murcia. Un émetteur infrarouge a été placé dans chaque sous-zone de 9 m^2 . Des étiquettes de références espacées d'une distance de 1 m ont été placées au plafond. Les résultats expérimentaux ont montré que le système présente une précision de 65% pour une erreur inférieure ou égale à 1 m.

1.4.5.4 Systèmes de localisation par son audible

L'exploitation du son audible permet également de fournir une estimation de la position dans les environnements intérieurs.

La plupart des dispositifs mobiles tels que le téléphone portable, le PDA sont équipés par des émetteurs de son. Les systèmes de localisation peuvent alors réutiliser ces équipements afin de localiser leurs propriétaires dans les environnements intérieurs.

Toutefois, à cause des propriétés du son audible, son utilisation pour la localisation en intérieur présente des limitations. En effet, le son audible n'a pas une grande capacité à passer à travers les murs. Par conséquent, la portée permise par les systèmes de positionnement exploitant cette technologie est limitée à une salle. Par ailleurs, la transmission d'un son audible par les systèmes de positionnement dans les environnements intérieurs pourrait déranger les personnes se trouvant à l'intérieur de ces environnements.

Dans [27]-[28], un système de localisation en intérieur, connu sous le nom Beep, utilisant les ondes sonores est décrit. Le système comporte des capteurs acoustiques placés à des positions fixes dans le banc d'essai. Il estime la position de l'objet par la méthode de triangulation en exploitant les mesures de temps d'arrivée. Le système atteint une erreur de localisation de 0.4 m pour 90% des mesures dans une salle de dimensions $20\text{ m} \times 9\text{ m}$.

Dans [29], les auteurs ont proposé un nouveau système de localisation basée sur la méthode des signatures. Le système définit une nouvelle signature basée sur le son d'ambiance et permettant d'identifier une salle. Ce choix de signature se justifie par le fait que la géométrie d'une salle, les meubles qu'elle contient ainsi que les sources de bruit (par exemple, les climatiseurs et les ordinateurs) qu'elle pourrait comporter forment un son distinct permettant de la caractériser. Pendant la phase de calibration, le système enregistre pour chaque salle sa signature ainsi qu'un numéro permettant de l'identifier. Pendant la phase de localisation, il estime la position de l'objet en identifiant la salle dans laquelle il se trouve. Celle-ci est déterminée moyennant l'algorithme du voisin le plus proche. Les résultats expérimentaux ont montré que le système réussit à localiser correctement la salle avec une précision de 69%.

Dans [3], Cem et al. se sont inspirés du système de localisation par ondes ultrasonores, DOLPHIN [20], afin de proposer un système de localisation basé sur la technique de multiplexage par étalement de spectre. Le système exploite les mesures de temps d'arrivée déterminées à partir de la corrélation entre le signal reçu par l'objet d'intérêt et les signaux émis par quatre émetteurs de son, placés au plafond. Contrairement au système DOLPHIN qui déploie la méthode de la latération, le système décrit dans [3] estime la position de l'objet d'intérêt par la méthode de trilatération. Par ailleurs, il propose deux méthodes pour le calcul de la position de l'objet. La première méthode calcule à partir des combinaisons de trois mesures de TOA quatre estimations de la position de l'objet. La moyenne des quatre estimations ainsi obtenues donne la position de l'objet. La deuxième méthode utilise seulement les trois mesures de TOA les plus fiables pour le calcul de la position de l'objet. Ces mesures correspondent à celles obtenues à partir des amplitudes de corrélation les plus fortes.

Des expérimentations menées à l'intérieur d'un bureau vide de dimensions $1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, situé à l'institut de Technologie d'Izmir, ont montré que le système permet une erreur de 2 cm pour 99% des mesures. Toutefois, il est intéressant de noter que le banc d'essai, où les expérimentations ont eu lieu, a été modifié afin de réduire les effets des trajets dus aux réflexions et les effets de l'environnement extérieur. En effet, le sol a été recouvert de tapis, le plafond de matériau de faible réflectivité et les murs ont été encerclés avec des rideaux. Une évaluation des performances de ce système dans un environnement plus réel sera alors donnée dans le chapitre suivant.

En comparant les différentes technologies ainsi présentées, nous constatons que la localisation par ondes radiofréquence présente l'avantage de bénéficier des infrastructures de réseaux existantes. En revanche, elle ne permet pas une bonne estimation de la position de l'objet d'intérêt. Contrairement à la radiofréquence, l'exploitation de la technologie infrarouge dans la localisation en intérieur permet une très bonne précision de localisation mais, requiert une infrastructure très coûteuse. Dans le cadre de cette

thèse, nous nous sommes orientés vers la technologie du son audible. D'abord, comme mentionné précédemment, la plupart des équipements portables sont équipés par cette technologie. Nous pouvons alors y bénéficier dans la conception des systèmes de localisation. Par ailleurs, elle permet d'atteindre une bonne précision de localisation.

En ce qui concerne l'audibilité du son, notre première solution à ce problème consiste à étaler la bande passante du signal en utilisant des séquences d'étalement. Ceci permettra de réduire la densité spectrale de puissance puisque l'énergie du signal est étalée sur la bande passante utile, et réduira alors l'audibilité des signaux.

1.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire les concepts de base de la localisation. Nous avons décrit quelques méthodes et algorithmes de localisation, parmi lesquels la méthode des empreintes et les algorithmes probabilistes. Nous avons par ailleurs présenté les systèmes de localisation les plus marquants dans la littérature ainsi que les principaux critères d'évaluation des systèmes de localisation.

Parmi les technologies et les techniques de localisation que nous avons présentées dans ce chapitre, nous allons maintenant nous focaliser sur celles qui interviennent dans les procédés de localisation utilisés dans le cadre de cette thèse. Ces procédés font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

Evaluation des performances d'un système de localisation acoustique destiné aux environnements internes et basé sur la technique des empreintes

2.1 Introduction

On propose dans ce chapitre un nouveau système de localisation acoustique permettant d'estimer la position d'un objet d'intérêt à l'intérieur d'une salle. Ce système pourra être adressé aux personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer, qui risquent d'oublier où ils ont mis leurs affaires. Equipés par un émetteur ou par un récepteur de son, les positions des malades sont estimées et enregistrées. Les patients peuvent alors revoir leurs déplacements effectués durant la journée. Une autre application possible de ce système consiste à fournir aux utilisateurs des informations cachées sur les objets se trouvant à l'intérieur d'une salle. Ces informations comprennent, par exemple, le nom de l'administrateur, le nom de l'imprimante et l'adresse IP d'un ordinateur.

On détaille dans les paragraphes qui suivent de ce chapitre le principe du système proposé, on évalue ses performances par expérimentations et dans deux architectures : une architecture orientée privée en utilisant la méthode d'accès multiple à répartition par code (ou CDMA pour Code Division Multiple Access) et une architecture centralisée en utilisant la méthode d'accès multiple à répartition dans le temps (ou TDMA pour Time Division Multiple Access). On étudie également l'effet de quelques paramètres sur les

performances du système et on propose un critère de choix des mesures les plus fiables pour l'estimation de la position.

On compare dans ce chapitre les performances du système proposé à celles du système de localisation sonore présenté dans [3], qui est basé sur la méthode de trilatération. Cette comparaison aura un double intérêt : Le premier sera de montrer l'apport de notre système par rapport aux systèmes de localisation existants. Le deuxième mettra en évidence l'effet de la réverbération acoustique (qui est analogue aux effets des trajets multiples dans le cas d'une propagation radio) sur les approches de localisation acoustique comme la méthode de la trilatération. Ceci présentera une contribution très importante à la littérature de la localisation.

2.2 Système de localisation proposé

Le système que nous proposons exploite les ondes sonores audibles afin de localiser un objet d'intérêt à l'intérieur d'une salle. Il repose sur la méthode des signatures et adopte la mesure de temps d'arrivée du signal de l'émetteur au récepteur comme signature. Il présente deux architectures : une architecture de localisation du récepteur déployant la méthode CDMA et une architecture de localisation d'une source déployant la méthode TDMA.

Le premier système peut être considéré comme un système à architecture orientée privée vu que l'objet d'intérêt n'émet aucun signal et qu'il utilise ses capteurs afin de détecter les signaux émis par le système de localisation. Le calcul de la position de l'objet d'intérêt se fait par une unité centrale placée au niveau de l'objet. Rappelons que les systèmes à architecture orientée privée doivent vérifier deux propriétés. La première est que l'objet d'intérêt n'a pas besoin d'informer les composants du système de sa présence. La deuxième est que les composants du système ne se chargent pas de l'estimation de la position de l'objet.

Le deuxième système proposé peut être vu comme un système à architecture centralisée : une unité centrale dans le système se charge du calcul de la position de l'objet à partir des données recueillies aux niveaux des récepteurs placés à des positions fixes. Le respect de la vie privée des utilisateurs est aussi considéré dans ce système vu que les utilisateurs peuvent arrêter d'émettre le signal sonore utile pour la localisation s'ils ne souhaitent pas que le système sache leurs positions.

Nous décrivons dans les paragraphes suivants les méthodes d'accès multiple utilisées dans notre système de localisation notamment la méthode TDMA et la méthode CDMA. Ces méthodes permettent le partage du support de communication entre les émetteurs du système de localisation proposé.

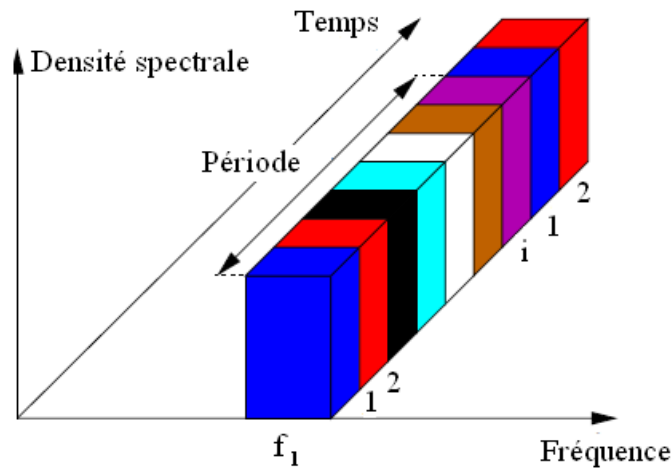


FIGURE 2.1: Principe d'accès TDMA.

2.2.1 Méthode d'accès multiple à répartition dans le temps

La Méthode d'accès multiple à répartition dans le temps, déployée par notre système de localisation à architecture centralisée, consiste à assigner à chaque utilisateur du système un intervalle de temps au cours duquel il transmet son signal (voir figure 2.1). Pour écouter la source i , les microphones placés à des positions fixes considèrent l'intervalle de temps i relatif à cette source.

2.2.2 Méthode d'accès multiple à répartition en codes

La Méthode d'accès multiple à répartition en codes permet d'accueillir à une même fréquence les signaux des différentes sources de notre système de localisation à architecture orientée privée grâce à la technique d'étalement à séquence directe (voir figure 2.2). A chaque source est assignée une séquence d'étalement qui est 'orthogonale' avec les séquences des autres sources. Pour écouter la source i , l'utilisateur du système multiplie le signal qu'il a reçu avec le code relatif à cette source. La technique d'étalement à séquence directe transforme chaque symbole de données de la source en un certain nombre de bits de la séquence d'étalement, appelés chips, augmentant ainsi la largeur de la bande du signal. Ceci réduit la densité spectrale de puissance du signal et diminue alors son audibilité. Il existe différentes séquences d'étalement permettant de discriminer entre les différents signaux des sources grâce à leurs propriétés d'inter-corrélation et d'auto-corrélation. Nous nous intéressons aux séquences binaires de longueur maximale (appelées aussi les m-séquence) et les codes de Gold.

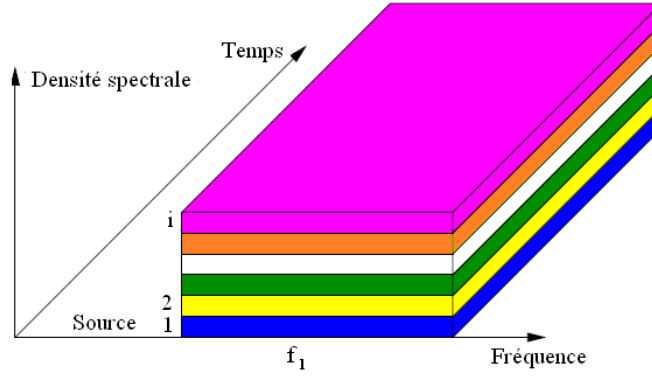


FIGURE 2.2: Principe d'accès CDMA.

2.2.2.1 Les m-séquences

Les m-séquences sont générées à partir de polynômes binaires primitifs de degré n et présentent une période $N_n = 2^n - 1$. Leur fonction d'auto-corrélation définie par :

$$\theta_{S,S}(\tau) = \sum_{i=0}^{N_n-1} S_i \times S_{i+\tau} \quad (2.1)$$

prend seulement deux valeurs différentes telles que :

$$\theta_{S,S}(\tau) = \begin{cases} N_n & \text{si } \tau = 0 \\ -1 & \text{si } \tau \neq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Leur fonction d'inter-corrélation prend trois valeurs possibles à savoir $\{-1, -t(n), t(n) - 2\}$ où

$$t(n) = 1 + 2^{[(n+2)/2]} \quad (2.3)$$

$[\beta]$ désigne la partie entière de β .

Les m-séquences présentent alors de bonnes propriétés d'auto-corrélation et d'inter-corrélation. Cependant, leur nombre est relativement faible du fait qu'elles sont générées à partir des polynômes primitifs.

2.2.2.2 Les séquences de Gold

Les séquences de Gold sont construites à partir de la combinaison de deux m-séquences. Désignons par u et v deux m-séquences de période $N_n = 2^n - 1$, la famille de séquences de Gold est donnée par :

$$G(u, v) = \{u, v, u \oplus v, u \oplus Dv, u \oplus D^2v, \dots, u \oplus D^{N_n}v\} \quad (2.4)$$

où \oplus l'opération logique du 'ou-exclusif' et D^i un opérateur de décalage cyclique de i vers la gauche.

La famille $G(u, v)$ comporte $(N_n + 2)$ séquences dont la fonction d'auto-corrélation prend les valeurs $\{N_n, -1, -t(n), t(n) - 2\}$ et dont la fonction d'inter-corrélation prend trois valeurs possibles soit $\{-1, -t(n), t(n) - 2\}$. Les séquences de Gold présentent de bonnes propriétés d'auto-corrélation et d'inter-corrélation. Par ailleurs, elles sont générées en grand nombre puisqu'elles sont obtenues par combinaison de deux m-séquences de même période [30]. Nous optons alors pour ce type de codes pour la réalisation de notre système de localisation.

Les systèmes à étalement de spectre présentent des inconvénients tels que l'interférence entre utilisateurs et l'effet d'éblouissement. L'effet d'éblouissement résulte de la différence de puissance des signaux reçus : en effet, le pic d'auto-corrélation d'un signal atténué pourrait être masqué par des pics d'inter-corrélation avec des signaux puissants. Il est, dans ce cas, difficile au récepteur de détecter le signal atténué. Pour combattre ces inconvénients, des techniques de détection à soustraction d'interférences et de contrôle de puissance à l'émission sont déployées. Le système de localisation ultrasonore à étalement de spectre, DOLPHIN [20], a utilisé un détecteur à soustraction successive d'interférences afin de réduire l'effet de l'interférence entre ses différents émetteurs. Les développeurs du système de localisation par ondes ultrasonores présenté dans [21] ont contrôlé la puissance émise en chaque point afin d'éviter l'effet d'éblouissement, sans qu'il y ait un contrôleur automatique de puissance. Pour notre système de localisation, aucune mesure de réduction d'interférences ni de réduction de l'effet d'éblouissement n'ont été prises. Nous évaluons ses performances en tenant compte de ces deux effets.

2.2.3 Méthode des signatures

Le système de localisation que nous proposons repose sur la méthode des signatures. Cette méthode est adaptée aux environnements en intérieur vu qu'elle ne requiert pas la présence d'une ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur. Elle estime la position de l'objet d'intérêt à partir des mesures préliminaires effectuées à des emplacements représentatifs pour les positions possibles de l'objet. Elle comporte alors deux phases : une phase de calibrage et une phase de localisation.

2.2.3.1 Phase de calibrage

La phase de calibrage requiert d'abord la définition d'une signature identifiant de façon unique la position. Une fois la signature est définie, la construction d'une base de données comportant les positions de référence (i.e., les emplacements représentatifs pour

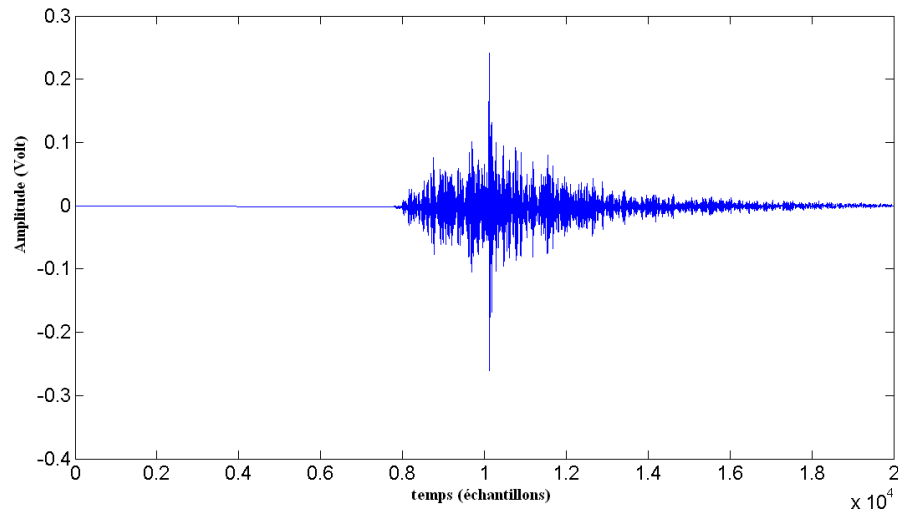


FIGURE 2.3: Corrélation du signal reçu par l'un des signaux émis par les sources.

les positions possibles de l'objet) est nécessaire. Cette base de données sera utile pour l'estimation de la position de l'objet d'intérêt pendant la phase de localisation.

Signature

Différents paramètres du canal de propagation permettent d'identifier la position : Le temps d'arrivée (ou TOA pour Time Of Arrival) du trajet d'amplitude maximale dépend de la position de l'émetteur et celle du récepteur. Pour un récepteur de position connue, il caractérise la position inconnue de l'émetteur. Pour un émetteur de position connue, il identifie la position inconnue du récepteur. Il présente alors un bon candidat pour la signature de notre système de localisation.

Le temps d'arrivée est estimé à partir de la corrélation entre le signal reçu et le signal émis. Dans le cas de notre système de localisation à architecture orientée privée, le récepteur calcule la corrélation entre le signal reçu et les différents codes des sources placées à des positions fixes. L'instant du pic de corrélation obtenu pour chaque code correspond à un estimé de TOA (figure 2.3). Les temps d'arrivée sont ensuite concaténés pour former la signature du récepteur. Dans le cas du système de localisation à architecture centralisée, les récepteurs placés à des positions fixes corréleront les signaux qu'ils ont reçus avec le code de la source. La concaténation des TOAs estimés donne la signature de la source.

Construction de la base de données

Nous avons calibré le banc d'essai de façon uniforme, tous les 30 cm sur la largeur et la longueur, comme le montre la figure 2.4. A chaque position, nous déposons la tige sur laquelle est fixé le microphone (ou le haut-parleur selon l'architecture du système).

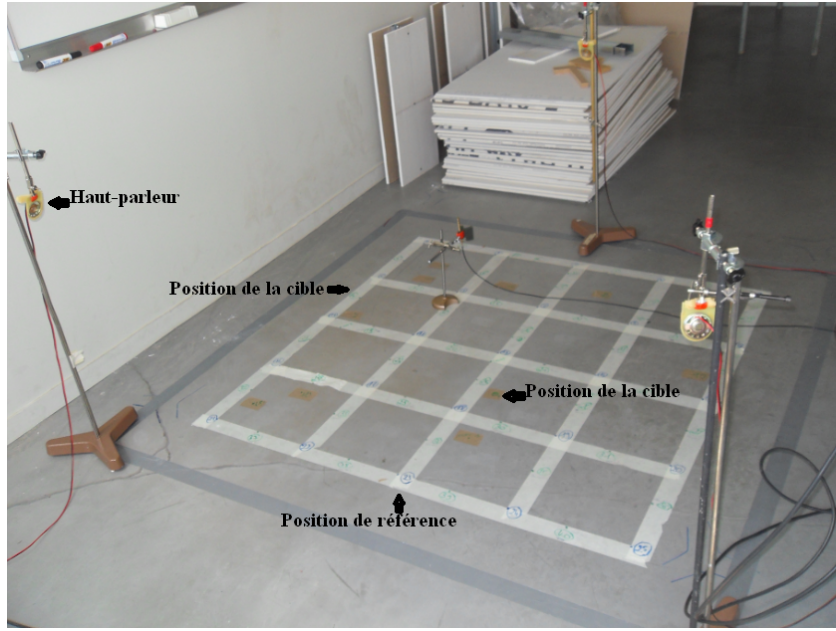


FIGURE 2.4: Configuration du système de localisation proposé.

Le signal est enregistré et la procédure d'estimation de TOA, décrite dans le paragraphe 2.2.3.1, est répétée pour $L = 25$ positions de référence. Les L signatures $s_{l_{1 \leq l \leq L}}$ ainsi obtenues et les positions $c_{l_{1 \leq l \leq L}}$ correspondantes sont stockées dans une base de données. Dans la phase en ligne, la position de l'objet d'intérêt est comparée aux signatures des références par le biais d'un estimateur de noyau.

2.2.3.2 Phase en ligne

Nous déposons l'objet d'intérêt à des endroits précis du banc d'essai. Nous relevons ses coordonnées cartésiennes (c_x, c_y) et nous estimons sa signature s . L'objet d'intérêt n'étant pas mobile, nous changeons sa position à chaque mesure. Nous cherchons, dans cette phase, à estimer la position, c , de l'objet à partir de sa signature s et la base de données précédemment construite. Les méthodes probabilistes de localisation comme celles présentées dans [31] [32] reposent sur l'estimation de l'espérance conditionnelle $E(c|s)$, qu'on note par $m(s)$. Cette estimation peut être réalisée par les méthodes d'estimation non paramétrique telles que la méthode de noyau. Nous détaillons, dans les paragraphes suivants, le principe de l'estimateur de noyau en considérant le cas des variables scalaires et le cas des variables vectorielles.

Estimateur à noyau : cas des variables scalaires

Par opposition aux techniques d'estimation paramétrique, les techniques d'estimation non paramétrique ne font aucune hypothèse sur la forme de la fonction à estimer.

Elles traduisent la relation d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres à l'aide d'un modèle général.

Etant une méthode d'estimation non paramétrique, la méthode de noyau effectuée au voisinage de chaque point est une régression locale. Le voisinage est assuré par une fonction de poids K , appelée fonction noyau. La fonction noyau est généralement une fonction de densité de probabilité [33]. Sa valeur, $K(y - z)$, augmente lorsque la valeur de $(y - z)$ diminue. En d'autres termes, plus la valeur de y est proche de celle de z , plus la valeur de $K(y - z)$ est grande.

Pour illustrer l'estimateur à noyau, nous considérons le développement en série de Taylor de degré p de l'espérance conditionnelle $m()$ au point s_i situé au voisinage du point s :

$$m(s_i) = m(s) + m'(s) \times (s_i - s) + \dots + m^p(s) \times (s_i - s)^p \times \frac{1}{p!} \quad (2.5)$$

L'équation 2.5 suggère une régression locale polynômiale au voisinage de s . En tenant compte de toutes les données (c_i, s_i) contenues dans notre base de données, nous obtenons le problème de minimisation suivant :

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^L \{m(s_i) - \beta_0(s) - \beta_1(s) \times (s_i - s) - \dots - \beta_p(s) \times (s_i - s)^p\}^2 \times K_h(s - s_i) \quad (2.6)$$

où $\beta(s) = (\beta_0(s), \beta_1(s), \dots, \beta_p(s))^T$ avec $\beta_p(s) = \frac{m^{(p)}(s)}{p!}$ et $m^{(p)}(s)$ la $p^{\text{ème}}$ dérivée de l'espérance conditionnelle $m(s)$. $K_h(\cdot)$ est la fonction définie par :

$$K_h(\cdot) = \frac{1}{h} K\left(\frac{\cdot}{h}\right) \quad (2.7)$$

K une fonction noyau et h une fenêtre de lissage. Celle-ci contrôle la convergence et l'équilibre biais-variance de l'estimateur. En remplaçant $m(s_i)$ par sa valeur c_i , le problème de minimisation 2.6 devient :

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^L \{c_i - \beta_0(s) - \beta_1(s) \times (s_i - s) - \dots - \beta_p(s) \times (s_i - s)^p\}^2 \times K_h(s - s_i) \quad (2.8)$$

La solution au problème de minimisation 2.8 est alors donnée par la méthode des moindres carrés pondérés :

$$\tilde{\beta}(s) = (S_s^T W S)^{-1} S_s^T W C_b \quad (2.9)$$

avec

$$S_s = \begin{pmatrix} 1 & s_1 - s & (s_1 - s)^2 & \dots & (s_1 - s)^p \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & s_L - s & (s_L - s)^2 & \dots & (s_L - s)^p \end{pmatrix}$$

$$C_b = \begin{pmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_L \end{pmatrix}$$

et

$$W = \left(\text{diag}(K_h(s - s_1) \dots K_h(s - s_L)) \right)$$

$\text{diag}(A)$ désigne la matrice diagonale dont la diagonale correspond à A .

Contrairement à la régression paramétrique des moindres carrés, cet estimateur dépend de s : Il s'agit bien d'une régression locale au point s . En notant par $\tilde{\beta}_0(s), \dots, \tilde{\beta}_p(s)$ les composants de $\tilde{\beta}(s)$, l'estimateur local polynômial de la fonction de régression m est donné par :

$$\tilde{m}(s) = \tilde{\beta}_0(s) \quad (2.10)$$

Prenons quelques valeurs particulières de p . Pour $p = 0$, $\tilde{\beta}(s)$ se réduit à $\tilde{\beta}_0(s)$ et nous obtenons l'estimateur localement constant, connu sous le nom de l'estimateur de Nadaraya-Watson :

$$\tilde{m}(s) = \frac{\sum_{i=1}^L K_h(s - s_i) \times c_i}{\sum_{i=1}^L K_h(s - s_i)} \quad (2.11)$$

Pour $p = 1$, nous obtenons l'estimateur localement linéaire défini par [33] :

$$\beta_0(s) = \frac{T_{h,0}(s)S_{h,2}(s) - T_{h,1}(s)S_{h,1}(s)}{S_{h,0}(s)S_{h,2}(s) - S_{h,1}^2(s)} \quad (2.12)$$

avec $S_{h,j}(s) = \sum_{i=1}^L K_h(s - s_i)(s_i - s)^j$ et $T_{h,j}(s) = \sum_{i=1}^L K_h(s - s_i)(s_i - s)^j c_i$

L'estimateur localement linéaire est plus précis en termes de l'erreur quadratique moyenne que l'estimateur de Nadaraya-Watson : Il présente un biais plus petit et une variance égale. Ceci est généralisé au cas où p est supérieur à 1 [33]. Les estimateurs d'ordres impairs présentent des performances meilleures que les estimateurs d'ordres pairs. Nous optons alors pour l'estimateur localement linéaire pour notre système de localisation.

Estimateur à noyau : cas des variables vectorielles

La méthode de régression polynômiale dans le cas multidimensionnel est une généralisation du cas unidimensionnel. Considérons le cas particulier de l'estimateur localement linéaire, i.e., $p = 1$, le problème de minimisation devient alors :

$$\min_{\beta_0(s), \beta_1(s)} \sum_{i=1}^L \{c_i - \beta_0(s) - \beta_1^T(s) \times (s_i - s)\}^2 \times K_H(s - s_i) \quad (2.13)$$

avec $K_H(.) = \frac{1}{\det(H)} K(H^{-1}(.))$, H est la matrice de lissage (ou en anglais bandwidth matrix), $\det(H)$ son déterminant et H^{-1} son inverse.

La solution à ce problème de minimisation est donnée par :

$$\tilde{\beta}(s) = (\tilde{\beta}_0(s), \tilde{\beta}_1(s)) = (S_s^T W S_s)^{-1} S_s^T W C_b \quad (2.14)$$

où

$$S_s = \begin{pmatrix} 1 & (s_1 - s)^T \\ \dots & \dots \\ 1 & (s_L - s)^T \end{pmatrix}$$

$$C_b = \begin{pmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_L \end{pmatrix}$$

et

$$W = \left(\text{diag}(K_H(s - s_1) \dots K_H(s - s_L)) \right)$$

$\tilde{\beta}_0(s)$ estime la fonction de régression et $\tilde{\beta}_1(s)$ estime sa dérivée. En utilisant les notations suivantes :

$$S_0 = \sum_{i=1}^L K_H(s - s_i) \quad (2.15)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^L K_H(s - s_i) \times (s_i - s) \quad (2.16)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^L K_H(s - s_i) \times (s - s_i) \times (s_i - s)^T \quad (2.17)$$

$$T_0 = \sum_{i=1}^L K_H(s - s_i) \times c_i \quad (2.18)$$

et

$$T_1 = \sum_{i=1}^L K_H(s - s_i) \times (s_i - s) \times c_i \quad (2.19)$$

l'estimateur localement linéaire estime la position c de l'objet d'intérêt par [34] :

$$\tilde{c} = \frac{T_0 - S_1^T - S_2^{-1}T_1}{S_0 - S_1^T - S_2^{-1}S_1} \quad (2.20)$$

Notons que S_1 et T_1 sont des vecteurs à d_e éléments et S_2 est une matrice de dimensions $d_e \times d_e$; où d_e est la dimension de la signature de l'objet d'intérêt.

En ce qui concerne la fonction noyau, nous avons opté pour la fonction noyau la plus couramment utilisée notamment la fonction gaussienne donnée par :

$$K(y) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{d_e}{2}}} \times \exp\left(\frac{1}{2} \times y^T \times y\right) \quad (2.21)$$

Par ailleurs, nous avons adopté la règle de Scott généralisée [33] pour définir la matrice de lissage H :

$$H = L^{\frac{-1}{d_e+4}} \times C_0 \quad (2.22)$$

C_0 étant la matrice de covariance des signatures des positions de références s_1, s_2, \dots, s_L et L étant le nombre de positions de références.

Dans ce qui suit, nous présentons les performances de notre système de localisation évaluées par expérimentations dans une salle de stagiaires à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans.

2.3 Evaluation expérimentale des performances du système proposé

Nous évaluons par expérimentations les performances de notre système de localisation dans deux architectures : architecture orientée privée et architecture centralisée. Les performances sont données en termes de précision en fonction de l'erreur de localisation (ou *precision versus accuracy*) et en termes de distribution de précision sur la zone d'intérêt (ou *precision distribution in the work area*). Rappelons que l'erreur de localisation correspond à la distance entre la position réelle de l'objet à localiser et sa position estimée. La 'Précision' (ou Precision) désigne la fonction de distribution cumulative, qui à chaque valeur d'erreur de localisation e , associe le pourcentage des mesures ayant au moins e pour erreur. La distribution de précision représente la précision par position. Avant de commencer notre campagne de mesures, nous avons effectué des mesures préliminaires qui ont conduit aux choix des valeurs suivantes pour les paramètres du système :

- 51200 Hz pour la fréquence d'échantillonnage,
- 3000 Hz pour la fréquence de porteuse et la fréquence de chip,
- 127 chips pour la longueur de la séquence de Gold.



FIGURE 2.5: Photos du site d'expérimentation.

2.3.1 Description du site d'expérimentation

Il s'agit d'une salle des stagiaires de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans. Comme montré à la figure 2.5, elle comporte des ordinateurs, des bureaux et différents matériaux. Par ailleurs, elle comporte un ventilateur mécanique contrôlé générant un bruit cyclique de 25 Hz (voir figure 2.6). La zone d'intérêt dans laquelle nous avons effectué les mesures est de dimensions $1.5 \times 1.5 \times 0.75 \text{ m}^3$.

Notons que le banc d'essai décrit dans le système de localisation présenté dans [3] a été encerclé avec des rideaux. Le plafond a été recouvert de matériau de faible réflectivité et le sol de tapis. Dans notre expérimentation, aucune disposition n'a été prise pour réduire les effets des réflexions et les effets extérieurs sur le banc d'essai.

2.3.2 Matériel

Pour le système de localisation à architecture orientée privée, nous avons déployé au maximum quatre haut-parleurs, un microphone, deux amplificateurs, une carte d'acquisition et un ordinateur (figure 2.7). Pour le système de localisation à architecture centralisée, nous avons utilisé quatre microphones, un haut-parleur, deux amplificateurs, une carte d'acquisition et un ordinateur.

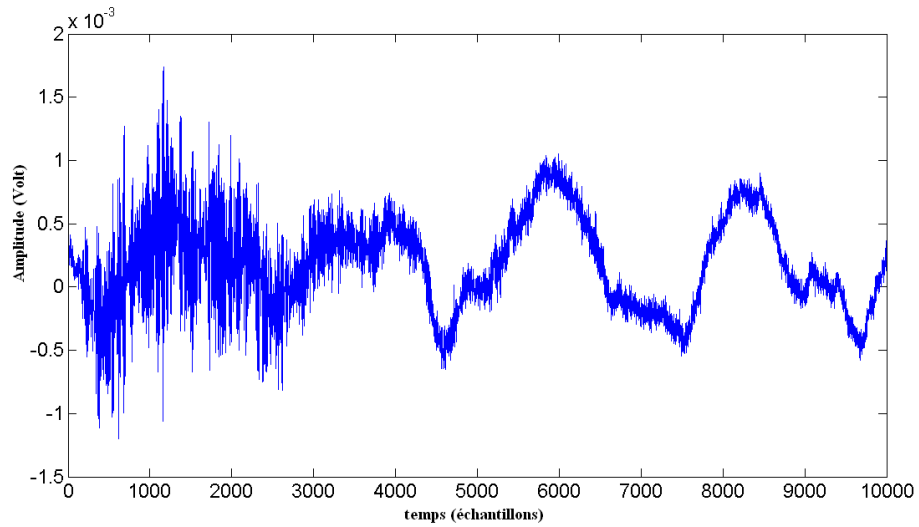


FIGURE 2.6: Signal reçu.

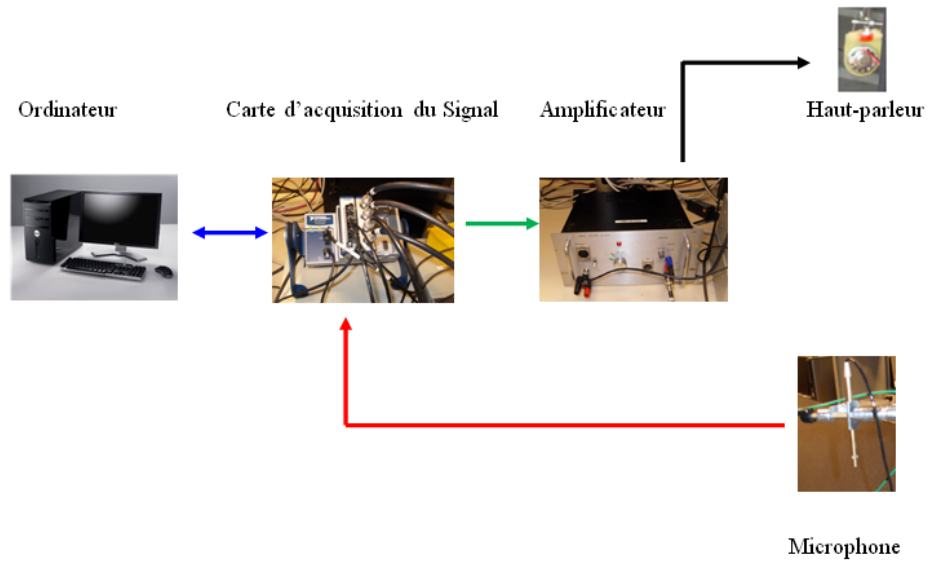


FIGURE 2.7: Schéma de raccordement du système de localisation.

La carte d'acquisition comporte deux modules : un module d'acquisition, *NI9234* [35], à convertisseur analogique-numérique de type Delta-Sigma à 24 bits et un module, *NI9263* [36], à convertisseur numérique-analogique de type String à 16 bits. Le microphone est à condensateur pré-polarisé avec préamplificateur intégré et présente une sensibilité de 10 mV/Pa . Les signaux sont émis à faible amplitude afin qu'ils soient légèrement audibles. L'acquisition de données entre l'ordinateur et la carte d'acquisition est effectuée par le biais du logiciel LabVIEW. Le traitement du signal s'est fait par l'intermédiaire de Matlab.

Les performances du système de localisation à architecture orientée privée seront présentées dans le prochain paragraphe.

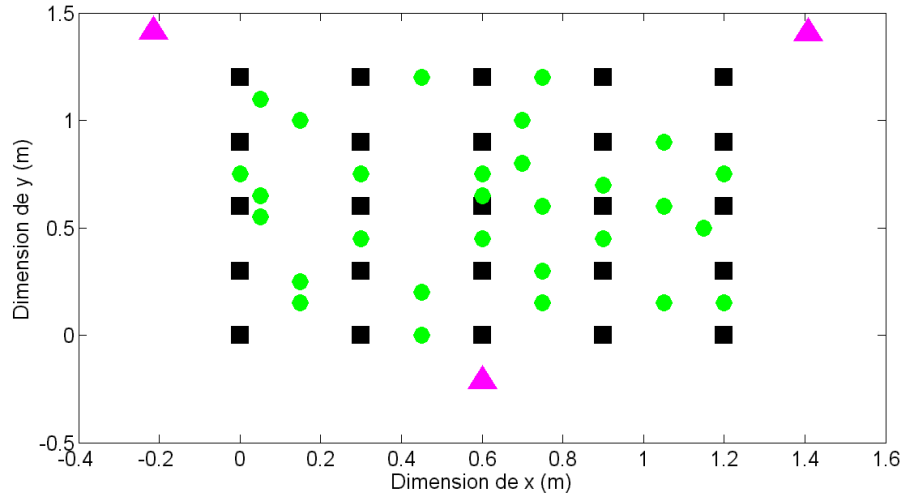


FIGURE 2.8: 1^{er} banc de test du système de localisation à architecture orientée privée.

2.3.3 Système de localisation à architecture orientée privée

Dans le système de localisation à architecture orientée privée, nous plaçons trois haut-parleurs à des positions fixes dans le banc d'essai et nous faisons varier la position du microphone. Nous assignons à chacun des trois haut-parleurs un code de Gold unique. Les trois haut-parleurs émettent simultanément leurs codes de Gold modulés en phase. Pendant la phase de calibrage, nous plaçons le microphone à chaque position de référence. Nous corrélons le signal reçu avec les différents codes des haut-parleurs afin d'estimer la signature de la position de référence. Pendant la phase de localisation, nous disposons la tige sur laquelle est fixé le microphone à des positions précises dans le banc d'essai. Nous déterminons la signature du microphone et nous estimons sa position à l'aide de l'estimateur localement linéaire et ce à partir de la base de données construite durant la phase de calibrage. La figure 2.8 montre l'emplacement des trois haut-parleurs, les positions de référence et les positions de l'objet d'intérêt. Les haut-parleurs sont représentés par des triangles et les positions de références et de l'objet d'intérêt sont respectivement représentés par des rectangles et des cercles.

Pour évaluer les performances de notre système de localisation, nous avons prélevé 29 positions aléatoirement distribuées dans la zone d'intérêt et situés à une hauteur de 28 cm. Nous avons effectué plus de 30 mesures à chaque position. Cependant, nous avons remarqué que nous obtenons les mêmes résultats que si nous considérons 7 mesures. Nous reportons dans les prochains paragraphes les résultats obtenus avec 7 mesures.

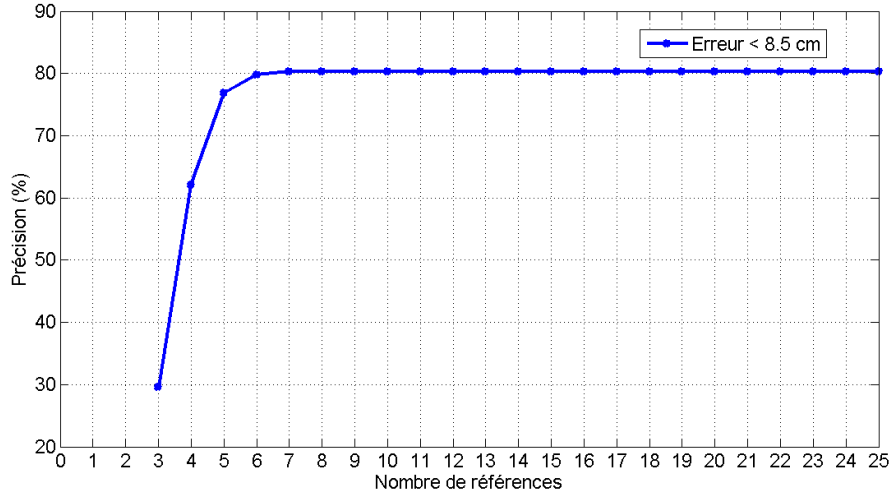


FIGURE 2.9: Précision de localisation pour une erreur de 8.5 cm en fonction du nombre de références.

2.3.3.1 Performance du système de localisation à architecture orientée privée

Nous reportons dans le tableau 2.1 la fonction de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenue avec notre système de localisation à architecture orientée privée. Le système permet une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm, qui est de l'ordre de l'un quart du pas de maillage, et ce pour environ 80% des mesures.

Erreur (cm)	5	6	8.5	12	15
Précision (%)	55.66	66.5	80.29	90.64	94.08

TABLE 2.1: Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec le système de localisation à architecture orientée privée. 1^{er} banc de test.

D'autre part, nous étudions l'effet du nombre de positions de références sur les performances du système. Seulement, les M meilleures positions de références, selon le poids $K_H(s_i - s)$, contribuent à l'estimation de la position. Rappelons que s_i représente la signature de la position de référence i et s représente la signature de l'objet qu'on cherche à localiser. La précision de localisation pour une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm obtenue pour différentes valeurs de M est représentée sur la figure 2.9. Nous constatons que nous atteignons la même précision pour $M \geq 7$ positions de références. Les autres positions de références ne contribuent alors pas à l'estimation de la position. Ceci s'explique par le fait que la fonction noyau assigne un poids faible quand la valeur $(s_i - s)$ est élevée.

Par ailleurs, nous examinons l'effet des M meilleures positions de références sur la distribution de la précision dans la zone d'intérêt. Les précisions de localisation pour

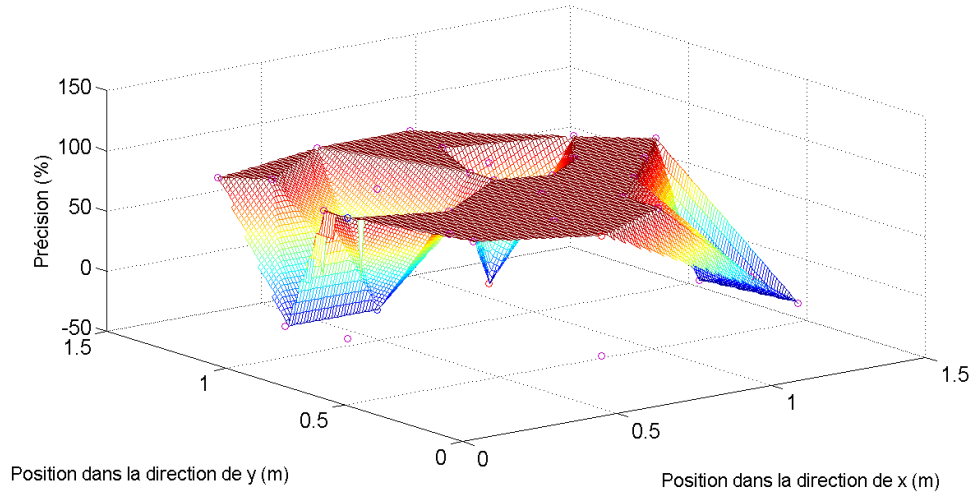


FIGURE 2.10: Distribution de la précision pour une erreur de 8.5 cm, $M = 7$.

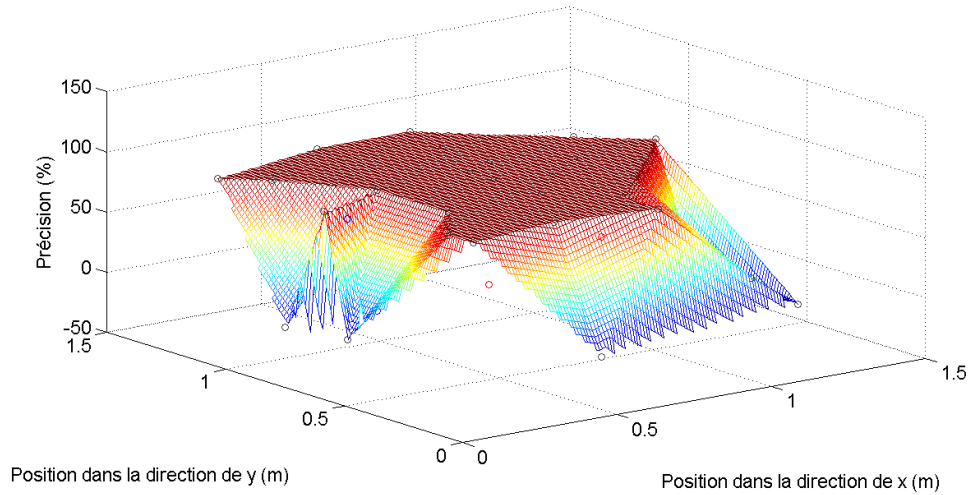


FIGURE 2.11: Distribution de la précision pour une erreur de 8.5 cm, $M = 10$.

une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm obtenue avec les 7 et 10 meilleures positions de références sont respectivement reportées sur les figures 2.10 et 2.11. Les résultats numériques extraits de ces figures sont reportés dans le tableau 2.2. 100% des mesures par position ont une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm pour 23 positions et ce pour $M = 7$ et $M = 10$. Cependant, il est important de remarquer que 21 positions présentent les mêmes résultats quelque soit la valeur de M et que 2 positions ont des résultats différents. Nous concluons que, pour estimer les positions situées au centre de la zone d'intérêt, il est préférable d'utiliser la valeur de $M = 10$, alors que, pour localiser les microphones aux bords de la zone d'intérêt, il est préférable d'utiliser la valeur de $M=7$. Par conséquent, le système permet une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm pour 100% des mesures effectuées à 25 positions et pour 87.19% des mesures totales.

Positions	Précision (%), M=7	Précision (%), M=10
Position1	100	0
Position2	0	0
Position3	100	100
Position4	100	100
Position5	100	100
Position6	100	100
Position7	100	100
Position8	100	100
Position9	0	0
Position10	0	100
Position11	100	100
Position12	100	100
Position13	100	100
Position14	100	100
Position15	100	100
Position16	100	100
Position17	100	100
Position18	100	100
Position19	100	100
Position20	28.5714	28.5714
Position21	100	0
Position22	0	0
Position23	100	100
Position24	100	100
Position25	100	100
Position26	0	100
Position27	100	100
Position28	100	100
Position29	100	100

TABLE 2.2: Distribution de la précision pour une erreur de 8.5 cm.

Nous comparons dans le paragraphe suivant les performances de notre système de localisation à celles du système de localisation sonore à étalement de spectre décrit dans [3]. Ce système déploie quatre haut-parleurs émettant chacun un code de Gold unique et utilise la méthode de la trilatération afin d'estimer la position du microphone. Il repose sur les mesures de temps d'arrivée obtenus à partir de la corrélation entre le signal reçu et les différents codes des haut-parleurs.

2.3.3.2 Comparaison avec un système de localisation sonore à étalement de spectre

Afin de mener une comparaison objective du système de localisation sonore présenté dans [3] avec notre système, nous avons évalué ses performances dans notre banc d'essai. Les fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation relatives à ces deux systèmes sont représentées sur la figure 2.12. Les résultats montrent que le système proposé présente des performances meilleures que celui décrit dans [3]. Notre système

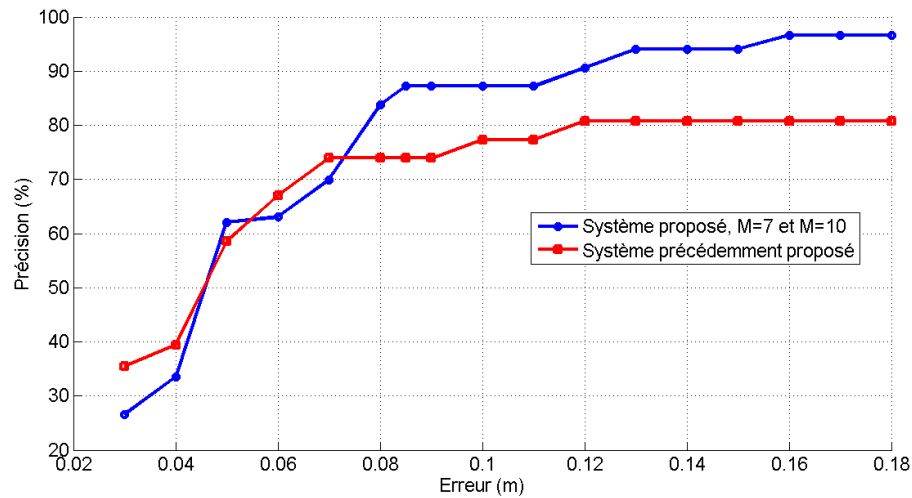


FIGURE 2.12: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation du système proposé et de celui présenté dans [3].

permet une erreur de 8.5 cm pour 87% des mesures, alors que, le système dans [3] atteint une erreur de 12 cm avec 80% des mesures. Cependant, il est à noter que pour une erreur inférieure ou égale à 7 cm, les fonctions de distribution cumulative de l'erreur des deux systèmes sont similaires et qu'à partir de cette valeur, le système proposé devient meilleur.

Il est intéressant de signaler que le système proposé dans [3] présente des performances inférieures à celles reportées dans [3]. Ceci est dû au fait que des dispositions ont été considérées afin de réduire les effets des réflexions et les effets extérieurs sur le banc d'essai présenté dans [3]. Notre banc d'essai fait partie de l'environnement réel et n'a pas été modifié pour évaluer les performances du système. Cette comparaison montre l'effet de la réverbération sur la méthode de la trilatération. Cet effet a été déjà démontré dans le cas de la localisation par ondes radiofréquences. En effet, dans la littérature de la localisation par ondes radiofréquences, les premières approches ont ignoré les effets des trajets multiples et ont eu recours à la méthode de triangulation en se basant sur les mesures de la puissance du signal reçu aux niveaux des stations de base voisines. Les travaux ultérieurs ont eu plus de succès puisqu'ils ont utilisé la méthode des signatures qui tient compte de l'effet des trajets multiples. De même, ici, nous avons constaté que la précision de la méthode de la trilatération se dégrade dans les environnements acoustiques réels. Bien que ce résultat ne soit pas surprenant, nos expérimentations sont les premières à montrer l'effet de la réverbération sur les approches de localisation acoustique.

Dans ce qui suit, nous étudions l'effet du nombre des haut-parleurs ainsi que leurs emplacements sur les performances de notre système de localisation.

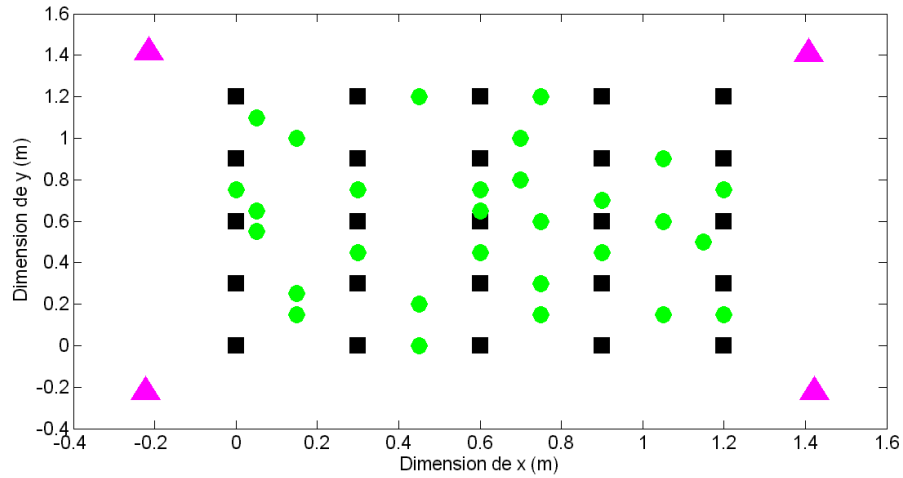


FIGURE 2.13: 2^{ème} banc de test du système de localisation à architecture orientée privée.

2.3.3.3 Effet du nombre des haut-parleurs

Nous plaçons quatre haut-parleurs à des positions fixes dans le banc d'essai comme le montre la figure 2.13. Nous gardons les mêmes positions de références et les mêmes positions de l'objet d'intérêt que celles du banc d'essai de la figure 2.8. Nous effectuons sept mesures par position. Quelques unes sont prises en présence des stagiaires autour de la zone d'intérêt.

Erreur (cm)	5	6	8.5	12	15
Précision (%)	27.58	32.01	37.93	48.27	58.12

TABLE 2.3: Précision en fonction de l'erreur de localisation du système de localisation à architecture orientée privée. 2^{ème} banc de test.

Nous reportons dans le tableau 2.3 la fonction de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenue dans le banc d'essai de la figure 2.13. Les résultats montrent une dégradation de la précision de 40% pour une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm, comparé au cas de trois haut-parleurs. Nos résultats sont en accord avec ceux trouvés avec Cem et al. [3] qui ont observé une dégradation de la précision de localisation en considérant quatre mesures de temps d'arrivée par rapport au cas de trois meilleurs mesures. Ces auteurs ont expliqué ces résultats par une mauvaise estimation de temps d'arrivée des trajets les plus longs. Une nette amélioration en termes de la précision de localisation a été observée par ces auteurs [3] suite à l'augmentation de la longueur du code de Gold à 511 chips.

Afin d'améliorer les performances de notre système, nous attribuons à chaque haut-parleur *un paramètre de qualité de pic de corrélation*. Selon ce critère, seuls les trois meilleurs haut-parleurs, vont contribuer à l'estimation de la position. Ceci signifie que seulement les trois haut-parleurs sélectionnés dans la signature de l'objet et qui sont

contenus dans la base de données sont utilisés dans le calcul de la position du microphone. Le paramètre de qualité de pic relatif au $i^{\text{ème}}$ haut-parleur est défini par :

$$q_i = \max(R_{R,S_i}(\tau)) \quad (2.23)$$

où R_{R,S_i} est l'inter-corrélation entre le signal reçu R et le signal S_i du $i^{\text{ème}}$ haut-parleur. Notons que ce critère a été proposé dans [3] mais, il n'a pas été appliqué. Nous illustrons dans le tableau 2.4 la fonction de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenue dans le cas de quatre haut-parleurs et dans le cas de trois meilleurs haut-parleurs. Les résultats montrent que le choix des trois mesures du temps d'arrivée les plus fiables apporte une amélioration de 24% comparé au cas des quatre haut-parleurs.

Erreur (cm)	5	6	8.5	12	15
Précision(%), 4 haut-parleurs	27.58	32.01	37.93	48.27	58.12
Précision(%), 3 meilleurs haut-parleurs	35.96	51.72	61.57	68.96	74.38

TABLE 2.4: Précision en fonction de l'erreur de localisation du système à architecture orientée privée utilisant 4 haut-parleurs ou 3 meilleurs haut-parleurs.

D'autre part, comme dans le cas du premier banc d'essai, nous examinons l'effet du nombre de références sur les performances du système pour les deux cas suivants : cas de trois meilleurs haut-parleurs et cas de quatre haut-parleurs. Les résultats, reportés sur les figures 2.14 et 2.15, montrent que la meilleure précision est obtenue pour $M = 6$ et $M = 7$ respectivement pour le cas de quatre haut-parleurs et le cas de trois meilleurs haut-parleurs. Nous reportons également dans le tableau 2.5 et la figure 2.16 les fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues dans le cas de quatre haut-parleurs et le cas de trois meilleurs haut-parleurs avec les valeurs respectives de $M = 6$ et $M = 7$. Le système permet une erreur inférieure ou égale à 8.5 cm pour 64.5% et 40% des mesures respectivement pour les trois meilleurs haut-parleurs et pour les quatre haut-parleurs. Une amélioration en précision de 3% a été observée en comparant ces résultats avec ceux obtenus avec toutes les références ($M = 25$).

Erreur (cm)	5	6	8.5	12	15
Précision (%) 4 haut-parleurs, $M = 6$	26.60	32.51	40.39	44.33	48.76
Précision (%) 3 meilleurs haut-parleurs, $M = 7$	43.84	53.69	64.53	70.44	72.90

TABLE 2.5: Précision en fonction de l'erreur de localisation du système à architecture orientée privée, $M \in \{6, 7\}$.

Par ailleurs, nous reportons, à titre de comparaison, à la figure 2.17, les fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenue avec notre système de localisation et avec le système de localisation sonore à étalement de spectre décrit dans [3] et évalué dans notre banc d'essai. Le système proposé permet une erreur inférieure ou

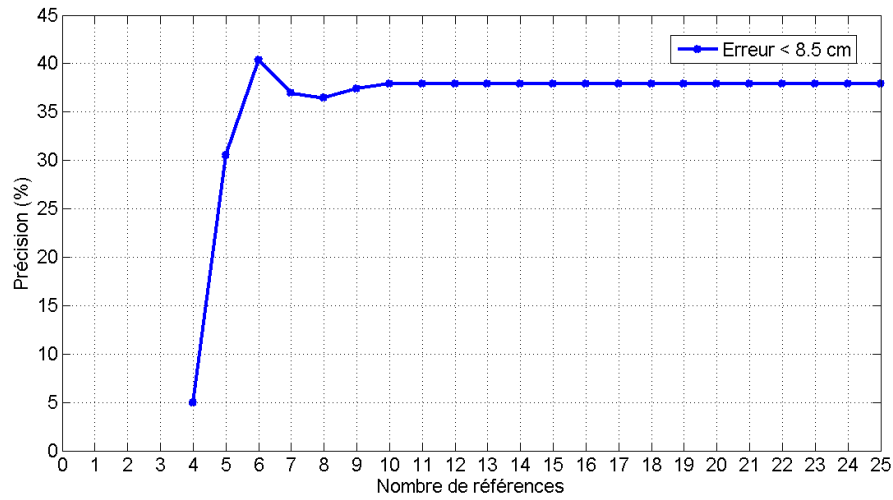


FIGURE 2.14: Précision de localisation pour une erreur de 8.5 cm en fonction du nombre de positions de référence, 4 haut-parleurs.

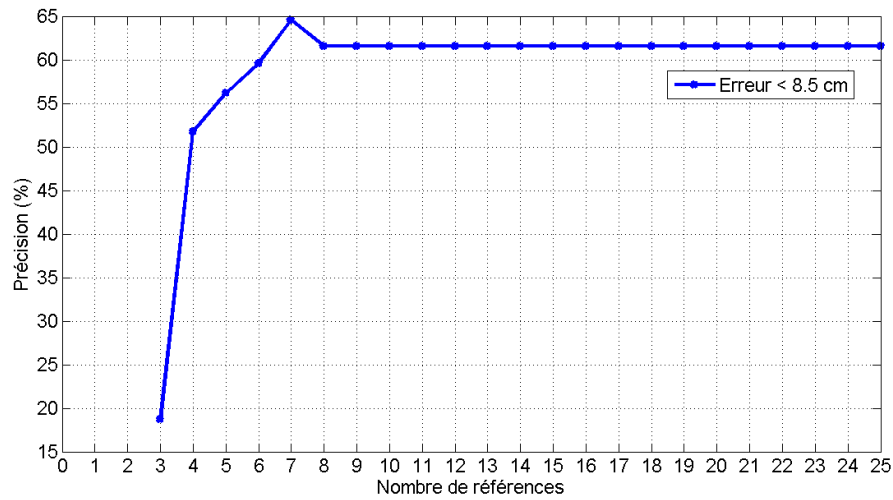


FIGURE 2.15: Précision de localisation pour une erreur de 8.5 cm en fonction du nombre de positions de référence, 3 meilleurs haut-parleurs.

égale à 8.5 cm pour 64% des mesures, alors que, le système dans [3] atteint une erreur inférieure ou égale à 18 cm pour ce même pourcentage de mesures. Comme dans le cas du premier banc d'essai, notre système présente des performances meilleures que celles du système décrit dans [3] pour des erreurs supérieures à 7 cm.

Dans ce qui suit, nous évaluons les performances de notre système de localisation à architecture centralisée et utilisant la méthode TDMA.

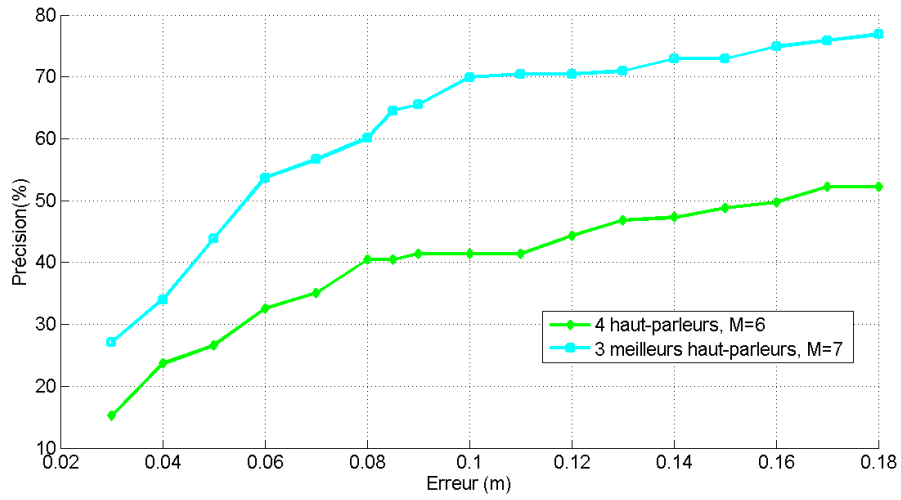


FIGURE 2.16: Précision en fonction de l'erreur de localisation, cas de 4 haut-parleurs et cas de 3 meilleurs haut-parleurs .

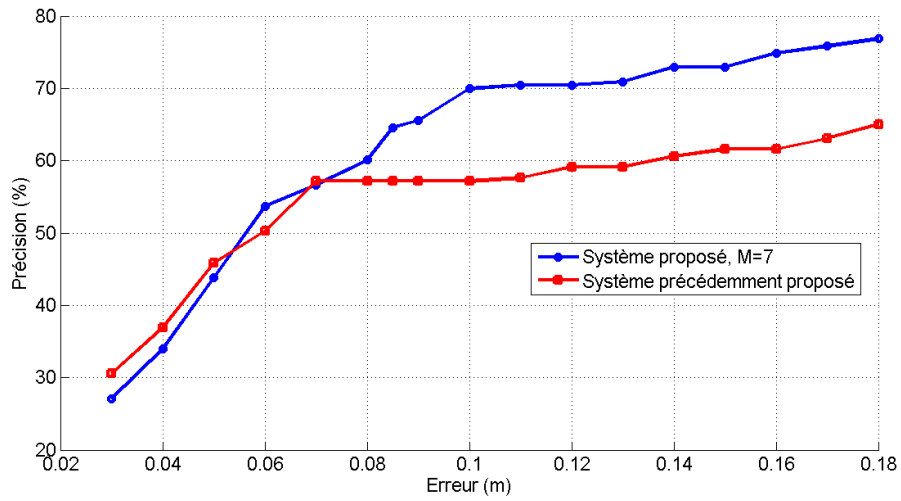


FIGURE 2.17: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation du système proposé et de celui présenté dans [3], cas de 3 meilleurs haut-parleurs.

2.3.4 Système de localisation à architecture centralisée

Dans le système de localisation à architecture centralisée, nous plaçons quatre microphones à des positions fixes dans le banc d'essai et nous faisons varier la position du haut-parleur. Ce dernier émet un code de Gold modulé en phase. Pendant la phase de calibrage, nous plaçons le haut-parleur à chaque position de référence. Nous corrélons le signal reçu au niveau de chaque récepteur avec le code du haut-parleur afin d'estimer la signature de la position de référence. Pendant la phase de localisation, nous disposons la tige sur laquelle est fixé le haut-parleur à des positions précises dans le banc d'essai. Nous déterminons la signature du haut-parleur et nous estimons sa position à l'aide de

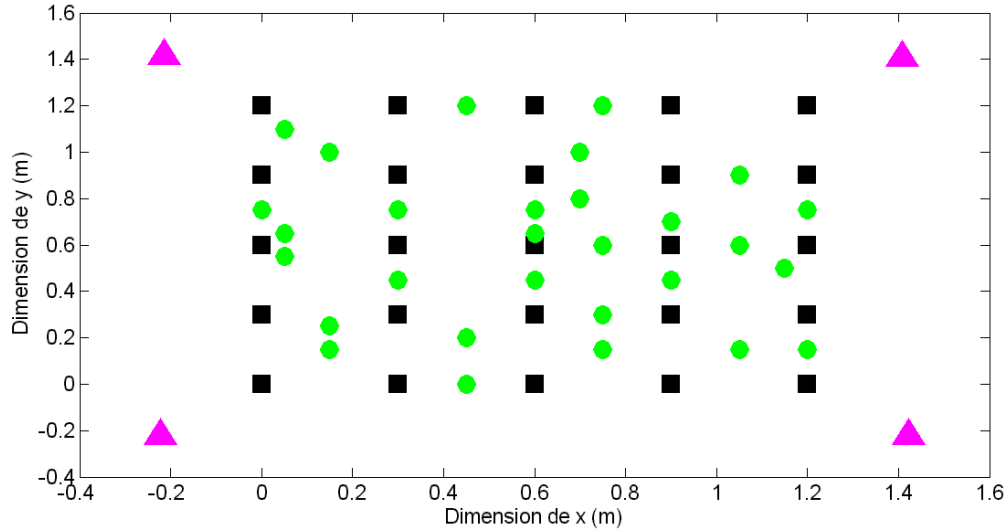


FIGURE 2.18: Banc de test du système de localisation à architecture centralisée.

l'estimateur localement linéaire à partir de la base de données construite durant la phase de calibrage. La figure 2.18 montre l'emplacement des quatre microphones, les positions de référence et les positions de l'objet d'intérêt. Les microphones sont représentés par des triangles et les positions de références et de l'objet d'intérêt sont respectivement représentés par des rectangles et des cercles.

Il est intéressant de remarquer que, dans cette architecture, nous avons déployé 4 microphones au lieu de trois. En effet, il est avantageux de déployer plusieurs récepteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires pour l'estimation de la position surtout qu'aucune interférence n'est présente. Néanmoins, nous devons prendre en considération le coût du système. Cette différence au niveau du nombre des récepteurs et des émetteurs déployés dans le système de localisation à architecture orientée privée et le système de localisation à architecture centralisée a été observée dans des travaux antérieurs tels que le système de localisation ultrasonore 3D-LOCUS [21].

2.3.4.1 Performance du système de localisation à architecture centralisée

Nous reportons dans le tableau 2.6 la fonction de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenue avec notre système de localisation à architecture centralisée.

Erreur (cm)	1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.6	2.7	3
Précision (%)	57.33	62.66	62.66	69.33	74.66	78.66	78.66	82.66	86.66	89.33	93.33	93.33

TABLE 2.6: Précision en fonction de l'erreur de localisation du système de localisation à architecture centralisée.

Le système proposé permet une erreur de l'ordre de 2.7 cm pour 93.33% des mesures. Comparé au système de localisation à architecture orientée privée, ce système

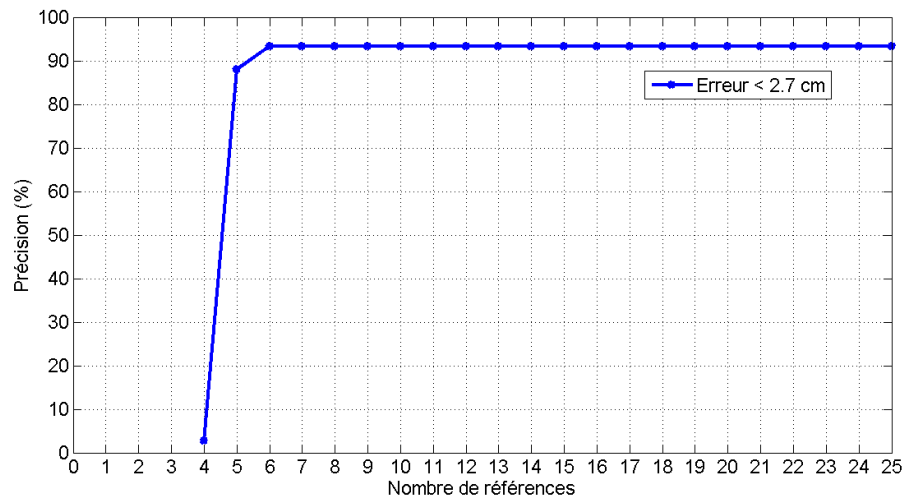


FIGURE 2.19: Précision de localisation pour une erreur de 2.7 cm en fonction du nombre de positions de référence.

présente des performances meilleures. Ceci est dû à l'absence de l'effet d'éblouissement et de l'interférence. Cependant, il est à noter que contrairement au système de localisation à architecture centralisée, le système de localisation à architecture orientée privée est capable de localiser simultanément plusieurs récepteurs.

D'autre part, l'effet du nombre de M meilleures positions de références sur les performances du système a été également étudié. Nous représentons sur la figure 2.19 la précision de localisation obtenue pour différentes valeurs de M . Nous constatons que pour $M \geq 6$, 93.33% des mesures ont une erreur de localisation inférieure ou égale à 2.7 cm. Nous illustrons également dans le tableau 2.7 la précision de localisation obtenue pour différentes valeurs de l'erreur de localisation et ce pour $M = 7$. Nous observons une amélioration d'environ 3% comparé aux résultats obtenus avec toutes les références.

Erreur (cm)	1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.6	2.7	3
Précision (%)	57.33	62.66	66.66	70.66	74.66	78.66	81.33	85.33	86.66	89.33	93.33	93.33

TABLE 2.7: Précision en fonction de l'erreur de localisation du système de localisation à architecture centralisée, $M = 7$.

Par ailleurs, nous représentons, sur la figure 2.20, la précision par position obtenue pour une erreur de 2.7 cm. 100% des mesures par position ont une erreur inférieure ou égale à 2.7 cm pour toutes les positions à l'exception de deux.

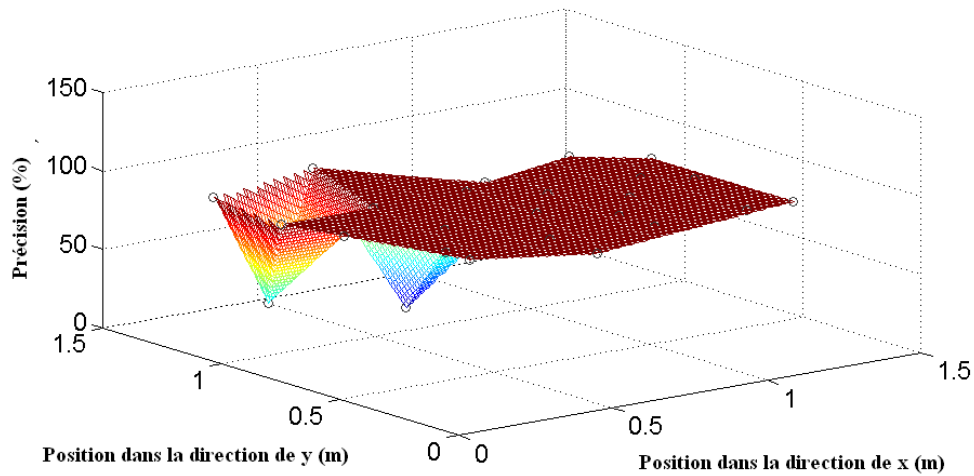


FIGURE 2.20: Distribution de la précision pour une erreur de 2.7 cm, $M = 7$.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système de localisation acoustique basé sur le temps d'arrivée et sur la méthode des signatures [1] [2]. Le système a été évalué dans deux architectures : une architecture orientée privée et une architecture centralisée. La première architecture utilise la méthode CDMA alors que la deuxième déploie la méthode TDMA. L'effet du nombre des haut-parleurs ainsi que leurs positions a été étudié dans la première architecture et l'influence du nombre de positions de références sur les performances des deux architectures a été examinée. Une détérioration des performances du système de localisation à architecture orientée privée a été observée en ajoutant un nouveau haut-parleur et en changeant l'emplacement des sources. Cependant, une amélioration a été atteinte en sélectionnant les trois meilleures sources à inclure dans l'estimation de la position. D'autre part, le choix des meilleures positions de référence a amélioré les performances de 7% et 3% respectivement pour le système à architecture orientée privée et pour le système à architecture centralisée.

Pour mener une comparaison objective entre notre système de localisation à architecture orientée privée et celui présenté dans [3], nous avons évalué les performances de ce système [3] dans notre banc d'essai. La fonction de distribution cumulative de l'erreur de notre système s'est révélée être meilleure. Cette comparaison confirme les résultats trouvés dans la localisation par ondes radiofréquences. Cependant, nos expériences sont les premières à montrer l'effet de la réverbération sur les approches de localisation acoustique. Le chapitre suivant sera consacré à la description et à l'emploi d'une technique de focalisation très puissante dans les milieux réverbérants, à savoir la technique du retournement temporel.

Chapitre 3

Système de localisation multi-échelles basé sur la méthode de retournement temporel

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré l'effet des trajets multiples sur l'estimation de la position de l'objet d'intérêt par la méthode de trilatération. La solution que nous avons proposée consistait à appliquer la méthode des signatures. Cependant, cette méthode présente quelques inconvénients tels que la construction de la base de données ainsi que le temps mis pour cette construction et la mémoire requise pour l'enregistrement de la base de données. Une autre solution à l'effet des trajets multiples consiste à déployer la technique de retournement temporel.

Depuis près de vingt-cinq ans [37], les techniques de retournement temporel ont été développées dans le domaine des ultrasons pour de nombreux domaines d'applications dont la détection des défauts dans les solides, l'acoustique sous-marine et l'imagerie et la thérapie médicales par ultrasons. Pour certaines applications récentes, le retournement temporel est utilisé dans le domaine audible [38] et pour des vibrations structurales, en particulier pour localiser les sources de vibrations dans une structure complexe [39].

Le retournement temporel repose sur l'invariance de l'équation de propagation d'onde acoustique par renversement de temps. Dans les milieux non dissipatifs, les équations gouvernant les ondes garantissent que pour toute onde divergente de la source, il existe une onde qui converge vers la source initiale. Ceci reste vrai si le milieu de propagation est objet à des réflexions, des réfractions et des diffusions. Le retournement temporel présente alors une technique de focalisation très puissante dans les milieux complexes [40].

Dans les environnements intérieurs, de nombreux obstacles sont présents comme les murs, le sol, le plafond, le mobilier. Ceux-ci génèrent des trajets multiples affectant les techniques de localisation par dégradation de leurs performances. Dans ce chapitre, nous déployons la méthode du retournement temporel pour la localisation en intérieur. Le canal multi-trajets est alors réduit à sa fonction d'auto-corrélation qui ressemble à une fonction de Dirac. Le système de localisation que nous proposons permet à un récepteur d'atteindre avec différentes précisions de localisation sa destination souhaitée qui est équipée par une source sonore. Le système peut également être appliqué pour trouver une source qui souhaite se localiser. Dans les deux cas, le récepteur se déplace, dans la zone d'intérêt à la recherche de la position qui maximise l'énergie du signal reçu.

Dans un premier temps, nous rappelons brièvement, dans ce chapitre, quelques notions de l'opération de retournement temporel notamment la cavité et le miroir à retournement temporel. Nous présentons le formalisme de cette méthode de point de vue du traitement de signal et nous introduisons le diagramme de directivité. Dans une deuxième partie, nous décrivons le scénario de notre système de localisation ainsi que l'algorithme du recuit simulé. Dans une troisième partie, nous présentons les performances du système évaluées par simulations et par expérimentations. Enfin, dans une dernière partie, nous nous intéressons à la réduction du délai de localisation de notre système.

3.2 Quelques notions de base relatives à la technique de retournement temporel

3.2.1 Retournement temporel et concept de la cavité à retournement temporel

En acoustique, l'équation de propagation d'onde en milieux non dissipatifs est invariante par renversement de temps puisque seules interviennent les dérivées temporelles d'ordre pair. Ceci implique qu'à chaque onde $\psi(r_r, t)$ divergente correspond une onde $\psi(r_r, -t)$ convergente vers sa source acoustique.

D. Casserau et M. Fink ont développé le concept de la cavité à retournement temporel [41]. Ils ont montré, en exploitant le théorème de Helmholtz-Kirchoff, que la seule connaissance du champ sur une surface fermée suffit pour réaliser l'opération de retournement temporel en tout point du volume. Il n'est pas alors nécessaire de connaître le champ en tout point du volume considéré pour atteindre la focalisation.

En reposant sur la propriété d'invariance de l'équation de propagation d'onde et sur le principe de Helmholtz-Kirchoff, une expérience de retournement temporel peut alors se décrire en deux phases : une phase d'enregistrement (ou réception) et une phase de

réémission (ou émission). Dans un premier temps, la source émet une impulsion acoustique. L'onde générée est réfléchiée, diffractée et diffusée dans le milieu de propagation. Un réseau de transducteurs répartis sur la surface de contrôle enregistre le champ reçu. Dans un second temps, chaque transducteur de la cavité réémet le champ enregistré dans une chronologie inverse par rapport à la réception. D.Cassereau et M.Fink ont démontré que le champ ainsi créé est égal à l'onde initialement émise mais retournée temporellement [41]. Cette onde converge vers la source initiale. Par ailleurs, ils ont démontré que la taille de la tache focale, définie comme la largeur à mi-hauteur de la zone sur laquelle l'énergie est focalisée, est limitée par le phénomène de diffraction. Cette taille est de l'ordre de la demi-longueur d'onde associée aux signaux utilisés.

3.2.2 Miroir à retournement temporel

La cavité à retournement temporel est difficilement réalisable en pratique. En effet, d'après le critère de Shannon, pour que le champ soit correctement échantillonné spatialement, il faut que la distance qui sépare deux transducteurs soit inférieure à la demi-longueur d'onde. Pour une fréquence de 1 MHz, par exemple, les transducteurs doivent être séparés d'une distance de 0.75 mm, ce qui nécessite 17000 transducteurs pour une cavité d'une dizaine de centimètres de diamètre [42]. En pratique, cette cavité est remplacée par une surface non fermée appelée le miroir à retournement temporel. Ce miroir à retournement temporel est composé de transducteurs capables d'enregistrer le champ en provenance des sources et de réémettre leurs retournés temporels dans le milieu de propagation. Chaque transducteur dispose des composants électroniques suivants : amplificateur, convertisseur analogique-numérique, des mémoires numériques et un générateur programmable capable de synthétiser le retourné temporel du signal enregistré dans la mémoire [40].

Dans ce qui suit, nous présentons le formalisme du retournement temporel de point de vue du traitement de signal.

3.2.3 Retournement temporel de point de vue du traitement de signal

Dans le cas des systèmes linéaires et invariants dans le temps, pour tout signal $S(t)$, émis par une source placée en r_s , le signal reçu à un point r_i s'écrit sous la forme d'une convolution entre le signal $S(t)$ et la réponse impulsionnelle du canal, $h_i(r_s, r_i, t)$, entre les deux points r_s et r_i :

$$R_i(t) = S(t) \otimes h_i(r_s, r_i, t) \quad (3.1)$$

Chaque transducteur i du miroir à retournement temporel réémet le signal qu'il a reçu dans une chronologie inverse :

$$R_i(-t) = S(-t) \otimes h_i(r_s, r_i, -t) \quad (3.2)$$

Le signal reçu à une position quelconque r_r s'écrit alors :

$$Y(r_r, t) = \sum_i S(-t) \otimes h_i(r_s, r_i, -t) \otimes h'_i(r_i, r_r, t) \quad (3.3)$$

où $h'_i(r_i, r_r, t)$ la réponse impulsionnelle entre r_i et r_r . A la position de la source, on obtient :

$$Y(r_s, t) = \sum_i S(-t) \otimes h_i(r_s, r_i, -t) \otimes h_i(r_i, r_s, t) \quad (3.4)$$

Le retournement temporel est alors, un filtre adapté au sens du traitement de signal. Durant la première phase, le signal initialement émis est filtré par le canal de propagation. Chaque trajet a une amplitude et un retard particuliers. Le retournement temporel renvoie dans le canal les différentes répliques du signal en compensant leurs retards : Les signaux les plus lents, arrivés en premier au niveau des transducteurs, sont réémis en premier et les signaux les plus rapides sont réémis en dernier. De ce fait, les signaux arrivent tous en même temps au point de la source et se somment alors de façon cohérente.

En utilisant les enveloppes complexes $S_e(t), h_{e_i}(r_s, r_i, t)$ et $h'_{e_i}(r_i, r_r, t)$ du signal $S(t)$ et des canaux $h_i(r_s, r_i, t)$ et $h'_i(r_i, r_r, t)$, nous pouvons écrire $Y_e(r_r, t)$, l'enveloppe complexe de $Y(r_r, t)$, comme suit :

$$Y_e(r_r, t) = \sum_i S_e^*(-t) \otimes h_{e_i}^*(r_s, r_i, -t) \otimes h'_{e_i}(r_i, r_r, t) \quad (3.5)$$

où a^* désigne le conjugué complexe de a .

Etant donné que $h_{e_i}(r_s, r_i, t) = \sum_k \alpha_{ik} \times e^{-jw\tau_{ik}} \delta(t - \tau_{ik})$ et $h'_{e_i}(r_i, r_r, t) = \sum_l \gamma_{il} \times e^{-jw\theta_{il}} \delta(t - \theta_{il})$ où $w = 2 \times \pi \times f$, f étant la fréquence de la porteuse, α_{ik} et τ_{ik} correspondent respectivement à l'atténuation et au retard du trajet k entre la source et le transducteur i . β_{il} et θ_{il} représentent respectivement l'atténuation et le retard du trajet l entre le transducteur i et le récepteur placé à la position r_r , nous obtenons alors :

$$Y_e(r_r, t) = \sum_i \sum_{l,k} \alpha_{ik} \times \gamma_{il} \times e^{jw(\tau_{ik} - \theta_{il})} \times S_e^*(-t - \tau_{ik} + \theta_{il}) \quad (3.6)$$

Le diagramme de corrélation spatiale (ou diagramme de directivité par analogie avec la physique) est obtenu à partir de la courbe $\zeta(r_r) = \max_t (|Y_e(r_r, t)|)$, $S(t)$ étant un signal impulsionnel. En observant l'expression de $Y_e(r_r, t)$, nous constatons que ce

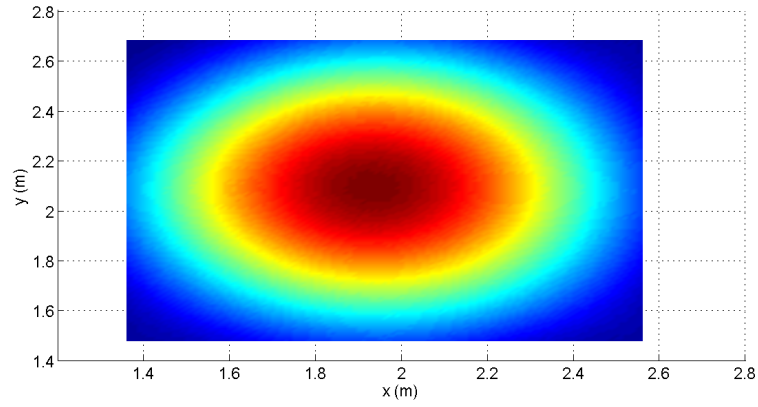
diagramme dépend à la fois de la fréquence f et des positions respectives de la source et du récepteur par rapport aux positions des transducteurs. Nous nous intéressons dans le paragraphe suivant à l'allure de ce diagramme.

3.2.4 Diagrammes de corrélation spatiale (ou diagrammes de directivité par analogie avec la physique)

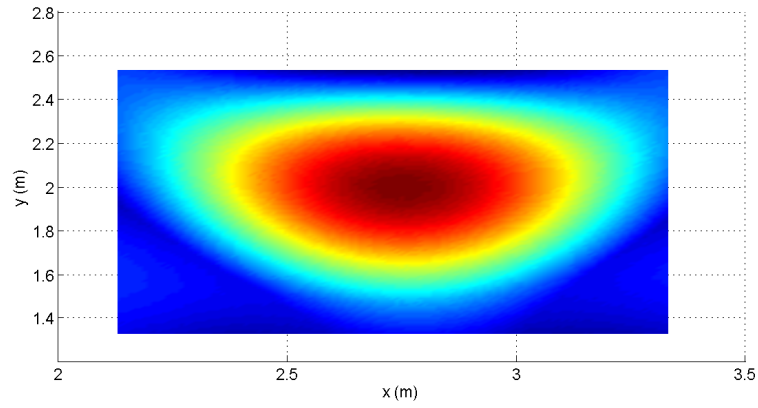
Nous considérons une salle de dimensions $4 \times 4 \times 2.2 \text{ m}^3$ équipée de quatre transducteurs. Dans un premier temps, nous représentons dans la figure 3.1 les diagrammes de corrélation spatiale de trois sources notées $SS1$, $SS2$ et $SS3$, obtenus avec une fréquence de 200 Hz. Le diagramme de corrélation spatiale d'une source donnée est calculé aux points qui l'entourent. Cette zone d'intérêt correspond à une zone carrée de largeur 1.2 m centrée à la position de la source. Nous remarquons que la forme du diagramme n'est pas la même pour les trois sources : Elle est circulaire pour $SS1$, qui est placée approximativement à la même distance des quatre transducteurs. Pour $SS2$ et $SS3$, situées à différentes distances des transducteurs, le diagramme tend vers une forme elliptique.

Dans un second temps, nous représentons sur la figure 3.2 les diagrammes de corrélation spatiale de la source $SS1$ pour différentes valeurs de la fréquence f . Comme attendu, l'allure du diagramme varie en fonction de f : le terme $e^{jw(\tau_{i_k} - \theta_{i_l})}$ de l'équation 3.6 contrôle cette allure. En effet, pour une valeur basse de la fréquence f , ce terme varie lentement en fonction de la position du récepteur (qui se traduit par le terme θ_{i_l}) donnant ainsi un diagramme plat. L'augmentation de la valeur de la fréquence générera des pics prématurés dans la zone d'intérêt et réduira la largeur du pic autour de la source. Pour une valeur assez élevée de f , ce terme varie rapidement générant ainsi un pic aigu à la position de la source et des pics prématurés dans la zone d'intérêt.

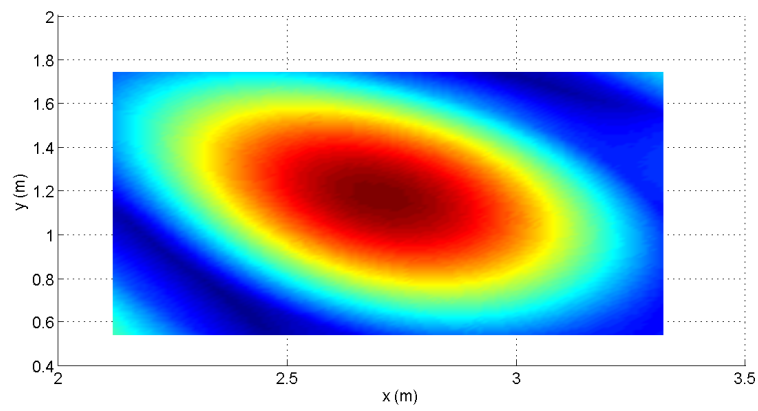
Dans un diagramme plat (fréquence basse), la position de la source n'est plus distinguée par rapport à ses proches voisins. Dans un diagramme présentant des pics prématurés (fréquences élevée), le récepteur, qui cherche la source, pourra croire la trouver en tombant sur l'un de ces pics. Il est alors difficile d'estimer la position de la source en considérant une seule fréquence porteuse. Cependant, il serait possible de varier la fréquence et tirer profit des allures respectives des diagrammes obtenus pour aboutir à une bonne précision de localisation. C'est cette idée-là qui représente la base de notre système de localisation.



(a)

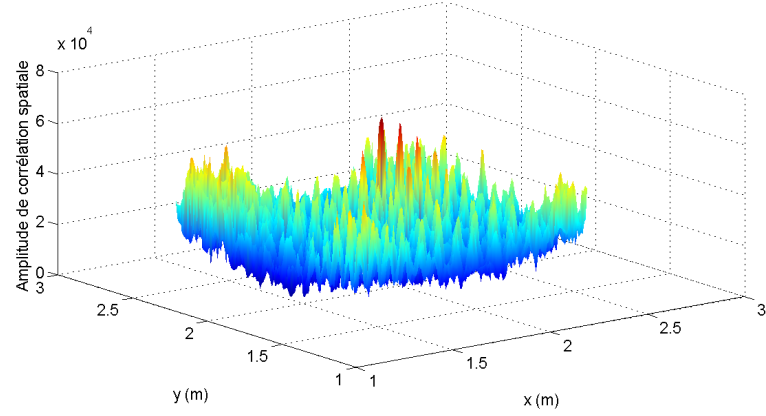


(b)

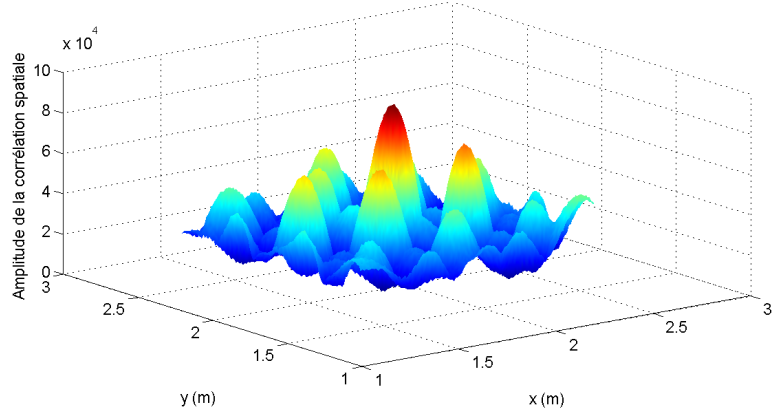


(c)

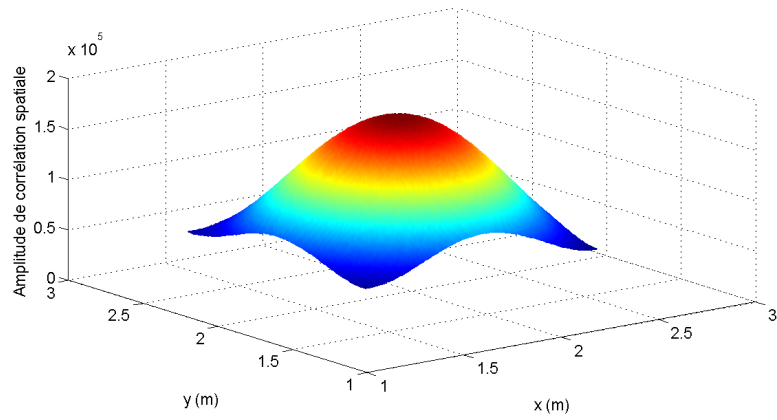
FIGURE 3.1: Diagrammes de corrélation spatiale obtenus avec $f = 200$ Hz et $d = 1.2$ m pour différentes sources : (a) $SS1$ ($1.96m, 2.08m, 1.5m$), (b) $SS2$ ($2.73m, 1.93m, 1.5m$) et (c) $SS3$ ($2.72m, 1.14m, 1.5m$).



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.2: Diagrammes de corrélation spatiale de la source *SS1* obtenue pour $d = 1.2$ m et pour différentes valeurs de la fréquence : (a) $f = 4$ kHz, (b) $f = 800$ Hz et (c) $f = 200$ Hz.

3.3 Système de localisation proposé

3.3.1 Scénario de localisation

Comme mentionné précédemment, le retournement temporel présente une méthode élégante de focalisation dans les milieux non dissipatifs, qu'ils soient homogènes ou hétérogènes. Dès lors, il s'avère intéressant de la déployer pour localiser une source sonore dans un environnement intérieur. Notre contribution consiste à tirer profit de la dépendance du diagramme de la corrélation spatiale de la fréquence porteuse utilisée, et ce afin de développer un système permettant une localisation avec différentes échelles de précision.

Le scénario de localisation de notre système se présente comme suit : La source émet une séquence de Gold de longueur 127 chips modulée à M_f fréquences. Le récepteur, cherchant la source, démodule le signal qu'il reçoit en utilisant la plus basse fréquence. Puis, il corrèle le signal obtenu avec la version retournée temporellement de la séquence de Gold émise. Il calcule, ensuite, le maximum de la corrélation et se déplace dans toute la zone d'intérêt, selon un algorithme d'optimisation. Dès qu'il atteint le maximum du diagramme de corrélation spatiale, le récepteur passe à une fréquence plus élevée pour estimer la position de la source, dans une zone de recherche réduite, avec une échelle plus fine. Cette zone de recherche est déduite à partir de la position précédemment estimée. Ce système pourrait être appliqué afin de permettre au récepteur d'atteindre sa destination souhaitée ou de localiser une source souhaitant se positionner.

L'application d'un algorithme d'optimisation dans notre système de localisation est nécessaire pour guider le récepteur vers la source. Dans ce qui suit, nous détaillons l'algorithme de recuit simulé. Celui-ci permet de trouver l'optimum global d'une fonction. Une version de cet algorithme correspond à un algorithme de descente.

3.3.2 Algorithme du recuit simulé [43]

Le recuit simulé est une méta-heuristique qui vise à trouver l'optimum global d'une fonction parmi plusieurs optimums locaux. Cette méthode est inspirée d'un processus en métallurgie appelé 'le recuit'. Ce dernier comprend des cycles de réchauffage et de refroidissement lents qui visent à minimiser l'énergie du matériau. Par analogie avec le processus physique, l'énergie du matériau devient la fonction du coût (ou fonction objective). La température du matériau est utilisée dans la méthode du recuit simulé comme paramètre de contrôle. Ce paramètre diminuera tout au long du processus jusqu'à atteindre une température finale.

L'idée de l'algorithme est comme suit : On part d'un état quelconque à une température T assez élevée. On effectue une modification de la solution, ce qui entraîne

une variation ΔE de l'énergie du système. Si cette variation est négative, on accepte la nouvelle solution. Sinon, on l'accepte avec une probabilité valant $\exp(-\frac{\Delta E}{T})$. On itère ensuite selon ce procédé en gardant la température constante. Dès qu'on atteint l'équilibre thermodynamique, on baisse la température. Au fur et à mesure que le système évolue, la température décroît et la probabilité d'acceptation des configurations dégradantes diminue. Le système tend alors vers une stabilisation dans un optimum global.

L'avantage de l'algorithme de recuit simulé est qu'il est capable d'éviter les optimaux locaux. En effet, l'acceptation d'une bonne solution (i.e., solution qui optimise la fonction objective) a tendance à chercher l'optimum dans le voisinage de la solution de départ, alors que, l'acceptation d'une mauvaise solution (i.e., solution qui dégrade la fonction objective) permet d'explorer une grande partie de l'espace de solutions et tend à éviter tout blocage sur un optimum local.

Dans ce qui suit, nous présentons le déroulement de l'algorithme du recuit simulé :

1. On engendre une configuration initiale quelconque
2. On se donne une température initiale T
3. **Tant** que Le système n'est pas figé **faire**
4. On fait une modification élémentaire de la solution qui entraîne une variation de l'énergie du système ΔE .
5. **Si** $\Delta E \leq 0$ **alors**
6. On accepte la modification
7. **Sinon**
8. On accepte la modification avec la probabilité $\exp(-\frac{\Delta E}{T})$
9. **Fin si**
10. **Si** Equilibre thermodynamique
11. On diminue légèrement T
12. **Fin si**
13. **Fin tant que**

Notons que pour $T = 0$, nous obtenons un algorithme de descente.

Dans notre système de localisation, l'algorithme de recuit simulé est appliqué pour gérer le déplacement du récepteur et guider ce dernier vers la source. Dans les paragraphes qui suivent, nous évaluons les performances de notre système de localisation en termes de précision et de délai de localisation. Cette évaluation est accompagnée d'une phase de réglage des paramètres de la méthode de recuit simulé.

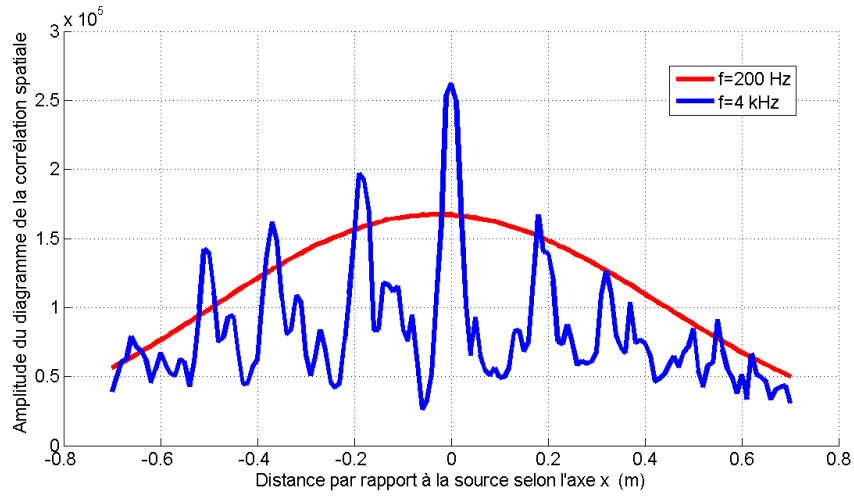


FIGURE 3.3: Coupe transverse du diagramme de corrélation spatiale de la source *SS1* dans le plan $y = 2.08$ m.

3.4 Evaluation des performances du système de localisation

Nous évaluons par simulation et par expérimentations les performances du système proposé avec $M_f = 2$. Le nombre et les valeurs de fréquences ont été choisies de telle manière que nous obtenions une bonne précision de localisation dans une zone d'intérêt de dimensions $1.2m \times 1.2m$, sans se soucier du délai de localisation de la source. Les valeurs de fréquence choisies sont : $f_1 = 200$ Hz et $f_2 = 4$ kHz. Comme le montre la figure 3.3, le diagramme obtenu à $f_1 = 200$ Hz est plat au voisinage de la source, alors que pour $f_2 = 4$ kHz, nous observons un pic aigu à la position de la source et des pics prématurés dans la zone d'intérêt. Le récepteur profite d'abord du diagramme plat pour éviter les pics prématurés obtenus avec $f = 4$ kHz. Puis, il change de fréquence pour détecter précisément la position de la source.

Les performances de ce système sont données en termes de précision moyenne de localisation, de précision par position et de délai de localisation. Rappelons que la précision pour une erreur e présente le pourcentage de mesures dont l'erreur est inférieure à cette valeur e . La précision moyenne est la moyenne de précision calculée sur toutes les sources qu'on souhaite localiser (ou atteindre). La précision par position est la précision relative à chaque source. Le délai de localisation est mesuré, dans ce chapitre, par le nombre moyen de déplacements nécessaires au récepteur pour localiser (ou atteindre) la source.

3.4.1 Evaluation par simulations

Nous évaluons, dans ce paragraphe, les performances du système proposé par simulations. Pour ce faire, il est nécessaire de modéliser les réflexions acoustiques sur les

murs de la salle. Le paragraphe suivant présente le modèle de la salle utilisé ainsi que les paramètres de simulations.

3.4.1.1 Modèle de la salle

Nous avons considéré une salle de dimensions $4 \times 4 \times 2.2 \text{ m}^3$ contenant quatre transducteurs dont les positions sont données dans le tableau 3.1. Pour modéliser les réflexions acoustiques dans la salle, nous avons adopté le modèle d'Allen et Berkeley [9]. Ce modèle utilise la méthode des sources-images pour simuler les réflexions dans une salle vide. La réponse impulsionnelle pour une source, située à une position $r_s = (x_s, y_s, z_s)$, et un microphone, placé à $r_r = (x_r, y_r, z_r)$, est donnée par :

$$h(r_s, r_r, t) = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \beta_{x_1}^{m_x - q} \beta_{x_2}^{m_x} \beta_{y_1}^{m_y - j} \beta_{y_2}^{m_y} \beta_{z_1}^{m_z - k} \beta_{z_2}^{m_z} \frac{\delta(t - \tau)}{4\pi d} \quad (3.7)$$

Les $(\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \beta_{y_1}, \beta_{y_2}, \beta_{z_1}, \beta_{z_2})$ représentent les coefficients de réflexion des quatre murs, du sol et du plafond. τ et d sont respectivement le retard et la distance du trajet entre la source et le récepteur. $M = \{(m_x, m_y, m_z) : m_x, m_y, m_z : \text{entiers}\}$ et $P = \{(q, j, k) : q, j, k \in \{0, 1\}\}$.

Nous avons choisi d'adopter ce modèle de salle vide parce qu'il s'avère difficile de modéliser le mobilier et les objets (formes et matériaux) qui pourront exister à l'intérieur d'une salle. Par ailleurs, la méthode du retournement temporel est indépendante du choix du modèle du canal vu qu'elle réduit le canal à une impulsion de Dirac ($\simeq \delta(t)$) à la position de la source.

	Transducteur 1	Transducteur 2	Transducteur 3	Transducteur 4
Positions des transducteurs	$(0.2m, 2m, 2m)$	$(2m, 0.2m, 2m)$	$(2m, 3.8m, 2m)$	$(3.8m, 2m, 2m)$

TABLE 3.1: Positions des transducteurs.

Pour évaluer les performances du système de localisation proposé, nous avons placé aléatoirement 9 sources dans la salle comme montré à la figure 3.4. Par ailleurs, nous supposons que le récepteur, qui souhaite localiser la source, se trouve dans une zone carrée de largeur d égale à $1.2m$ centrée à la position de la source. Notre système de localisation, dans cette configuration, peut être appliqué dans les environnements intérieurs où les objets sont classés selon leurs types : A chaque type d'objets est alors assigné une zone. Le récepteur se déplace dans toute la zone d'intérêt selon l'algorithme du recuit simulé en utilisant la basse fréquence. Il estime la position de la source puis, il passe à la haute fréquence pour calculer la position de la source dans une zone réduite avec une échelle fine. Le récepteur se déplace avec un pas maximal de 1 cm dans les directions de x et de y . L'effet du pas de déplacement sur les performances du système sera étudié, dans

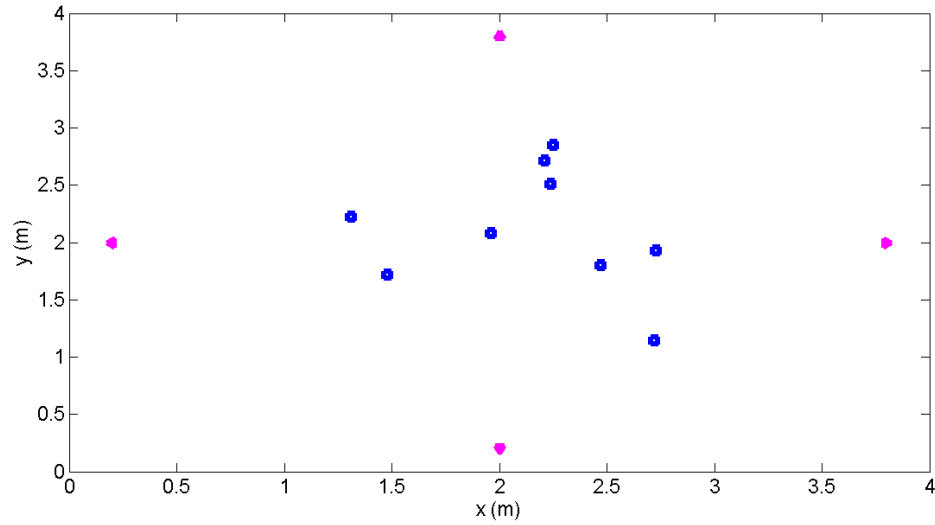


FIGURE 3.4: Disposition des sources à localiser dans la salle.

la suite. Dans le paragraphe suivant, nous discutons le choix des paramètres du recuit simulé.

3.4.1.2 Réglage des paramètres de recuit simulé

La connaissance des positions des sources nous permet de régler les paramètres du recuit simulé de manière à ce que nous obtenions la meilleure précision moyenne et la meilleure précision par position. Les paramètres principaux du recuit simulé sur lesquels nous pouvons jouer sont la température initiale, la loi de décroissance de la température, le critère correspondant à un équilibre thermodynamique (i.e., le nombre d'itérations ou de déplacements effectués à une température constante) et la condition d'arrêt.

Pour ce qui est de la loi de décroissance de la température, nous avons décrémente la température en la multipliant par $\alpha = 0.98$. Nous abaissons la température si tous les voisins d'une solution acceptée ont été générés ou si le nombre d'itérations effectuées à température constante dépasse la valeur 210. Le nombre d'itérations par palier de température trouvé après exécution de la méthode est nettement inférieur à cette valeur. En ce qui concerne la condition d'arrêt, nous arrêtons l'algorithme après N_p paliers de température. Nous déterminons empiriquement la valeur initiale de la température ainsi que le nombre de paliers permettant d'obtenir la meilleure précision de localisation pour une erreur de 1 cm. Pour ce faire, nous avons procédé comme suit : Nous exécutons pour différentes positions aléatoires du récepteur la méthode de localisation en fixant l'un de ces deux paramètres (température initiale et nombre de paliers) et en faisant varier l'autre. Nous renvoyons, pour les valeurs choisies des paramètres, la précision de localisation moyenne, la précision par position et le nombre moyen de déplacements du

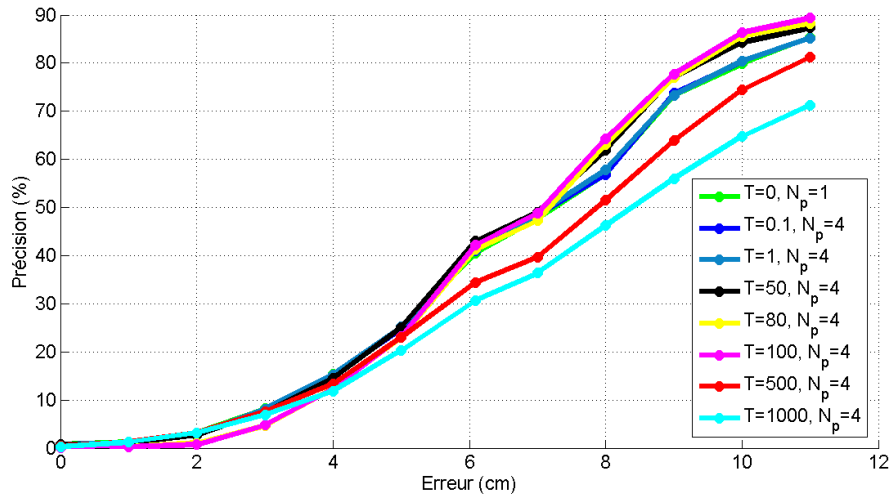


FIGURE 3.5: Précision moyenne en fonction de l'erreur de localisation obtenue pour différentes valeurs de température, $f = 200$ Hz.

récepteur nécessaires pour localiser la source. Le calcul du nombre moyen de déplacements du récepteur constitue une mesure du délai de localisation.

Choix de la valeur de la température initiale

Dans ce paragraphe, nous faisons varier la valeur initiale de la température en fixant le nombre de paliers à 4, et ce pour $f = 200$ Hz. Nous reportons à la figure 3.5 la précision moyenne de localisation en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec $f = 200$ Hz pour différentes valeurs de température. Pour $T = 0$, nous considérons 1 seul palier de température. A cette valeur de T (i.e., $T = 0$), le recuit simulé correspond à un algorithme de descente. Pour plus de détails sur ces résultats, nous illustrons dans le tableau 3.2 la précision moyenne pour une erreur de 8 cm pour les valeurs de température suivantes : 0, 0.1, 1, 50, 80, 100, 500 et 1000.

Température	0	0.1	1	50	80	100	500	1000
N_p	1	4	4	4	4	4	4	4
Précision(%)	57.04	56.82	57.84	61.91	63.08	64.31	51.51	46.28

TABLE 3.2: Précision moyenne pour une erreur de 8 cm obtenue avec différentes valeurs de température, $f = 200$ Hz.

Nous observons que les valeurs de $T \in \{50, 80, 100\}$ offrent les meilleures précisions de localisation. Pour une erreur de 8 cm, la précision s'est dégradée respectivement de 13% et 18% pour $T = 500$ et $T = 1000$ par rapport à celle obtenue avec $T = 100$. Une précision d'approximativement 57% est obtenue pour $T \in \{0, 0.1, 1\}$. Pour expliquer ces résultats, nous reportons dans le tableau 3.3 le nombre moyen de bonnes solutions ainsi

que celui de mauvaises solutions acceptées. Rappelons que les bonnes solutions sont les configurations qui optimisent la fonction objective, alors que, les mauvaises solutions représentent les solutions qui la dégradent et qui sont acceptées avec une probabilité $\exp(-\frac{\Delta E}{T})$. Nous définissons par ‘le nombre moyen’ la moyenne calculée sur toutes les réalisations (i.e., les différentes positions du récepteur), tous les paliers et toutes les sources. Nous constatons que l’augmentation du nombre de mauvaises solutions pour $T \in \{80, 100\}$ par rapport à $T \in \{0, 0.1, 1\}$ a permis d’explorer une bonne partie de l’espace de solutions et d’éviter les optimums locaux. Le nombre de solutions dégradantes pour $T \in \{500, 1000\}$ relativement élevé comparé à celui obtenu pour les autres valeurs de T a induit une dégradation de la précision de localisation. Le système nécessite, dans ce cas, un nombre plus élevé de paliers pour converger vers l’optimum global. Ceci, en revanche, augmentera le délai de la localisation de la source.

Température	0	0.1	1	50	80	100	500	1000
N_p	1	4	4	4	4	4	4	4
Nbre moyen de bonnes solutions	52	52	52	54	56	57	106	153
Nbre moyen de mauvaises solutions	0	$\simeq 0$	$\simeq 0$	2.672	4.67	6.15	60.7	110

TABLE 3.3: Nombre moyen de solutions acceptées obtenu avec différentes valeurs de température.

Nous illustrons dans le tableau 3.4 le nombre moyen de déplacements du récepteur pour les différentes valeurs de T . Nous définissons par le nombre moyen de déplacements la moyenne des déplacements effectués par le récepteur pour atteindre la source, calculée sur toutes les réalisations, tous les paliers et sur toutes les sources. Les déplacements comprennent les configurations acceptées qu’elles soient bonnes ou mauvaises, les configurations rejetées ainsi que les retours des configurations rejetées à la solution qui les a générées. D’après le tableau 3.4, nous constatons que ce nombre augmente avec la tem-

Température	0	0.1	1	50	80	100	500	1000
N_p	1	4	4	4	4	4	4	4
Nbre moyen de déplacements	129	176	177	183	189	193	328	413

TABLE 3.4: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de température et $f = 200$ Hz.

pérature T . En effet, l’augmentation de T augmentera la probabilité d’acceptation des configurations dégradantes ce qui, permettra d’explorer encore plus l’espace de solutions et augmentera alors leur nombre. En conclusion, nous pouvons choisir les valeurs 50, 80 et 100 comme valeur initiale de température pour la basse fréquence.

Pour passer à l’échelle fine (i.e., la haute fréquence), il s’avère nécessaire de définir, d’abord, la zone réduite de recherche de la position de la source. En observant la précision en fonction de l’erreur de localisation pour $T \in \{50, 80, 100\}$ et pour $f = 200$ Hz, nous

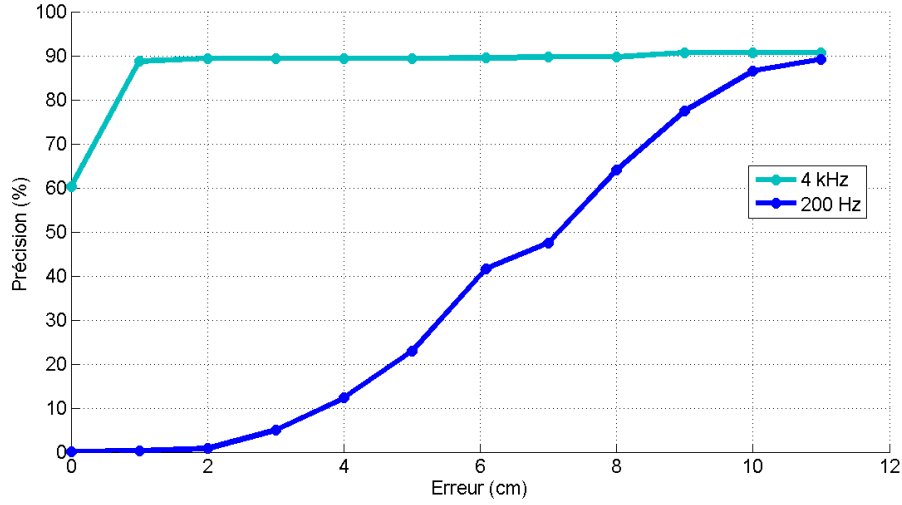


FIGURE 3.6: Précision moyenne en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec la méthode du recuit simulé en basse fréquence et avec un déplacement régulier du récepteur en haute fréquence.

remarquons qu'une erreur de 7 cm est obtenue avec une précision de 49%, pour $T = 100$, alors qu'une erreur de 8 cm est approximativement atteinte avec une précision de 64%, à la même valeur de T (figure 3.6). Nous obtenons une précision de 77% pour une erreur de 9 cm à $T = 100$. Cependant, nous choisissons la valeur de 2×8 cm comme largeur de la zone de recherche de la source en haute fréquence. Cette zone est représentée par une zone carrée centrée à la position estimée en basse fréquence. La valeur de 2×9 cm nous éloignera encore plus du pic de la source et fera apparaître plus de pics prématurés, ce qui dégradera les performances du système proposé. Nous reportons à la figure 3.6 la précision moyenne de localisation du système proposé en utilisant l'algorithme de recuit simulé à la basse fréquence avec $T = 100$ et $N_p = 4$. Pour la haute fréquence, le récepteur se déplace régulièrement dans la zone réduite pour trouver la position qui a l'amplitude maximale de la corrélation. Nous n'avons pas utilisé la méthode de recuit simulé en haute fréquence dû au fait que la zone réduite comporte quelques pics prématurés. Ceci nécessite une valeur initiale assez élevée de température et un nombre important de paliers pour converger vers l'optimum global, ce qui augmentera, en revanche, le délai de la localisation de la source.

Dans toute la suite, nous adoptons l'algorithme du recuit simulé pour la basse fréquence alors que pour la haute fréquence, le récepteur se déplace régulièrement dans la zone réduite. En ce qui concerne le réglage des paramètres de recuit simulé, nous renvoyons pour les valeurs choisies de ces paramètres la précision de localisation de tout le système (i.e., $f = 200$ Hz et $f = 4$ kHz) puisqu'elle dépend de la précision obtenue avec $f = 200$ Hz. Nous reportons dans le tableau 3.5 la précision par position pour une erreur de 1 cm pour les 9 sources et ce pour $T \in \{0, 50, 80, 100\}$ et $N_p \in \{1, 4\}$. La valeur de

Numéro de la source	Position de la source	$T = 0$	$T = 50$	$T = 80$	$T = 100$
1	(1.96 m, 2.08 m, 1.5 m)	95	99.40	99.80	100
2	(2.73 m, 1.93 m, 1.5 m)	75	77.20	81.60	83.40
3	(2.47 m, 1.8 m, 1.5 m)	94.40	94.80	95.60	95
4	(2.72 m, 1.14 m, 1.5 m)	89.80	89.80	89.60	89.80
5	(2.24 m, 2.51 m, 1.5 m)	88.80	89.20	90.40	91.20
6	(1.48 m, 1.72 m, 1.5 m)	76	80.20	82.60	83.40
7	(2.25 m, 2.85 m, 1.5 m)	69.40	81.40	84	85.40
8	(1.31 m, 2.22 m, 1.5 m)	84.60	86.80	87.60	88
9	(2.21 m, 2.71 m, 1.5 m)	73	79.80	80.80	82.40

TABLE 3.5: Précision par position pour une erreur de localisation de 1 cm obtenue avec différentes valeurs de température.

$T = 100$ permet la meilleure précision pour toutes les sources. Comparé à $T \in \{50, 80\}$, le nombre moyen de déplacements obtenu à $T = 100$ a légèrement augmenté (tableau 3.4).

Choix du nombre de paliers

Nous fixons T à 100 et nous faisons varier le nombre de paliers, N_p . L'augmentation de la valeur de N_p permet de fouiller encore plus l'espace de recherche tout en minimisant la valeur de la température et réduisant la probabilité d'acceptation des configurations dégradantes. Le tableau 3.6 montre une amélioration de la précision de localisation par position pour une erreur de 1 cm suite à l'augmentation de N_p . La précision par position

Numéro de la source	Position de la source	$N_p = 1$	$N_p = 2$	$N_p = 4$	$N_p = 10$
1	(1.96 m, 2.08 m, 1.5 m)	98.8	99.6	100	100
2	(2.73 m, 1.93 m, 1.5 m)	77.6	79.2	83.4	84.8
3	(2.47 m, 1.8 m, 1.5 m)	93.8	94.8	95	95.60
4	(2.72 m, 1.14 m, 1.5 m)	88.80	89.80	89.80	89
5	(2.24 m, 2.51 m, 1.5 m)	87.6	90.8	91.2	92.20
6	(1.48 m, 1.72 m, 1.5 m)	79.2	81.8	83.4	86.4
7	(2.25 m, 2.85 m, 1.5 m)	77.8	83.2	85.4	86.4
8	(1.31 m, 2.22 m, 1.5 m)	86.2	86.6	88	88.8
9	(2.21 m, 2.71 m, 1.5 m)	79	80.6	82.4	85.2

TABLE 3.6: Précision par position pour une erreur de localisation de 1 cm obtenue avec différentes valeurs de N_p et $T = 100$.

obtenue pour $N_p = 4$ est proche de celle obtenue avec $N_p = 10$. Nous nous contentons alors de cette valeur de N_p (i.e., $N_p = 4$). Le nombre moyen de déplacements du récepteur pour les différentes valeurs de N_p est illustré dans le tableau 3.7. Ce nombre reste inférieur à celui qu'on pourrait obtenir si le récepteur se déplace régulièrement dans toute la région d'intérêt et qui vaut 14641 positions.

N_p	1	2	4	6	8	10
Nbre moyen de déplacements	132	154	193	230	268	303

TABLE 3.7: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de N_p , $T = 100$ et $f = 200$ Hz.



FIGURE 3.7: Photos du site d'expérimentation.

Nous évaluons dans les expérimentations décrites dans le paragraphe suivant les performances du système proposé.

3.4.2 Evaluation par expérimentations

Dans ce paragraphe, nous évaluons par expérimentations effectuées dans une salle de Travaux Pratiques de l'école Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans les performances de notre système de localisation. La zone où nous avons effectué nos mesures est de dimensions $4 \times 4 \times 2.2 \text{ m}^3$ (figure 3.7). Les transducteurs sont disposés dans cette zone aux mêmes positions que celles dans les simulations. Nous utilisons la même séquence de Gold de longueur 127 chips ainsi que les mêmes valeurs de fréquences à savoir 200 Hz et 4 kHz. Cependant, nous cherchons à localiser deux sources au lieu de neuf : la première, notée $S1$, est placée à la position $(2.5\text{m}, 1.5\text{m}, 1.52\text{m})$ et la deuxième, notée $S2$, est située au milieu de la salle (i.e., à la position $(2\text{m}, 2\text{m}, 1.52\text{m})$). Les résultats expérimentaux obtenus pour ces deux sources pourraient être généralisés aux cas des autres sources de la zone d'intérêt.

Nous mesurons, par pas de 2 cm, le signal reçu après retournement temporel dans une zone de dimensions $48 \times 48 \text{ cm}^2$ centrée à la position de la source. Nous effectuons alors 625 mesures pour chaque source. La zone de mesure est montrée à la figure 3.8.

Il est intéressant de mentionner qu'il n'était pas possible de garder les mêmes dimensions de la zone d'intérêt, le même nombre de sources à localiser et le même pas



FIGURE 3.8: Zone de mesure.

de mesure du signal reçu comme dans les simulations. En effet, une zone de dimensions $1.2m \times 1.2m$ nécessite 14641 points de mesure pour chaque position de source. Au total, il nous faut 131769 points de mesures pour les 9 sources. Ceci pourrait être possible si on faisait déplacer le microphone sur un support téléguidé par exemple. Cependant, dans cette expérimentation, nous faisons varier le microphone manuellement sur la carte de mesure pour mesurer le signal reçu à chaque position.

3.4.2.1 Protocole expérimental

Dans un scénario classique d'une expérience de retournement temporel, une source réelle localisée à la position r_0 émet un signal sonore dans le milieu de propagation. Les signaux reçus sont enregistrés par les N_{MRT} microphones du miroir à retournement temporel, puis retournés temporellement et réémis grâce aux N_{MRT} haut-parleurs du miroir. Le signal reçu est enregistré par un microphone.

Dans notre expérimentation, nous suivons le scénario fait dans [38] qui tire profit du théorème de la réciprocité spatiale et qui vise à créer une source initiale virtuelle à la position r_0 . Notons que le théorème de la réciprocité implique que le champ en r_2 créé par une source en r_1 est le même que celui produit en r_1 par une source en r_2 . Dès lors, durant la première phase de notre expérimentation, le signal sonore initial est émis successivement par chacun des N_{MRT} haut-parleurs du miroir, puis enregistré sur le microphone de référence situé à la position r_0 . Durant la deuxième phase, les signaux ainsi enregistrés sont retournés temporellement puis réémis simultanément par les N_{MRT} haut-parleurs. Cette application du théorème de réciprocité spatiale permet alors d'utiliser N_{MRT} haut-parleurs et un seul microphone pour l'expérience de retournement temporel, plutôt que $(N_{MRT} + 1)$ couples de haut-parleur et microphone.

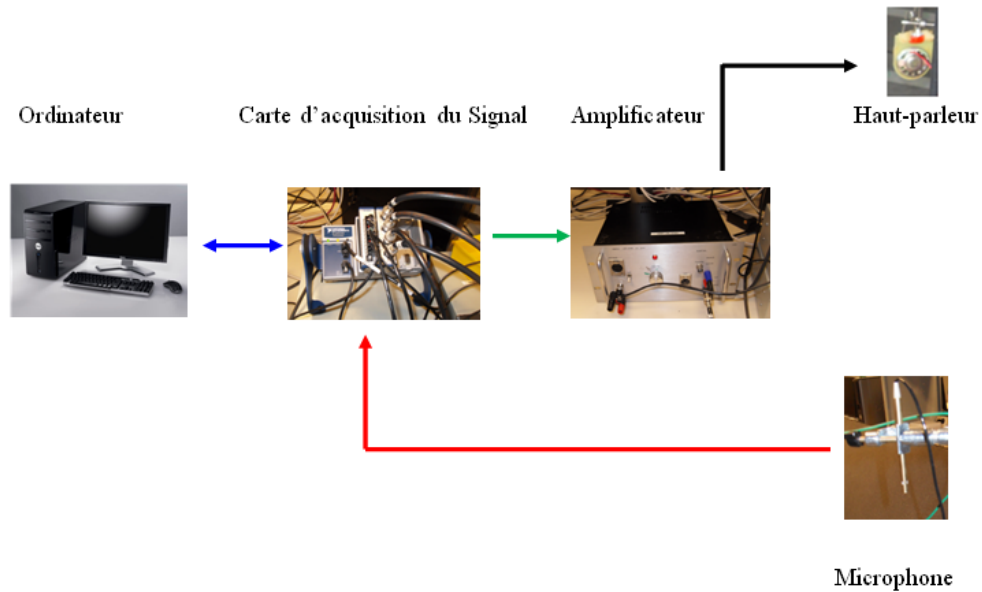


FIGURE 3.9: Schéma de raccordement du système de localisation.

3.4.2.2 Matériel

Le matériel utilisé dans cette expérimentation comporte une carte d'acquisition, deux amplificateurs, quatre haut-parleurs, un microphone et un ordinateur (figure 3.9). La carte d'acquisition est constituée de deux modules : le *NI9234* [35] et le *NI9263* [36]. Le premier est un module d'acquisition de données à quatre entrées analogiques, dont chacune dispose d'un convertisseur analogique numérique de type Delta-Sigma et de résolution 24 bits. La fréquence d'échantillonnage maximum est de 51.2 Kéchant/s. Le second est un module de sortie à quatre sorties analogiques. Chaque sortie dispose d'un convertisseur numérique analogique de type String et de résolution 16 bits. Par ailleurs, nous avons déployé un microphone $\frac{1}{4}$ à condensateur pré-polarisé avec préamplificateur intégré. Sa plage dynamique, désignant l'amplitude des intensités sonores qu'il peut reproduire, est de 122 dB. Les amplificateurs, *WI640*, utilisés présentent un rapport signal à bruit de 100 dB et une bande passante de 20 Hz à 20 kHz. Leur sensibilité d'entrée, définie par le gain (ou la tension) d'entrée nécessaire pour obtenir la puissance nominale de sortie de l'amplificateur, est 4 dBu à une charge de 8 Ohms.

Dans la première phase de l'expérience du retournement temporel, la carte d'acquisition du signal utilise une seule sortie pour émettre successivement le signal généré par l'ordinateur et une seule entrée pour enregistrer le signal reçu. Les quatre signaux reçus sont ensuite, retournés temporellement via Matlab. Dans la deuxième phase de l'expérience, la carte d'acquisition déploie quatre sorties afin d'émettre simultanément les signaux retournés temporellement. Une seule entrée a été utilisée pour enregistrer le signal reçu par le microphone.

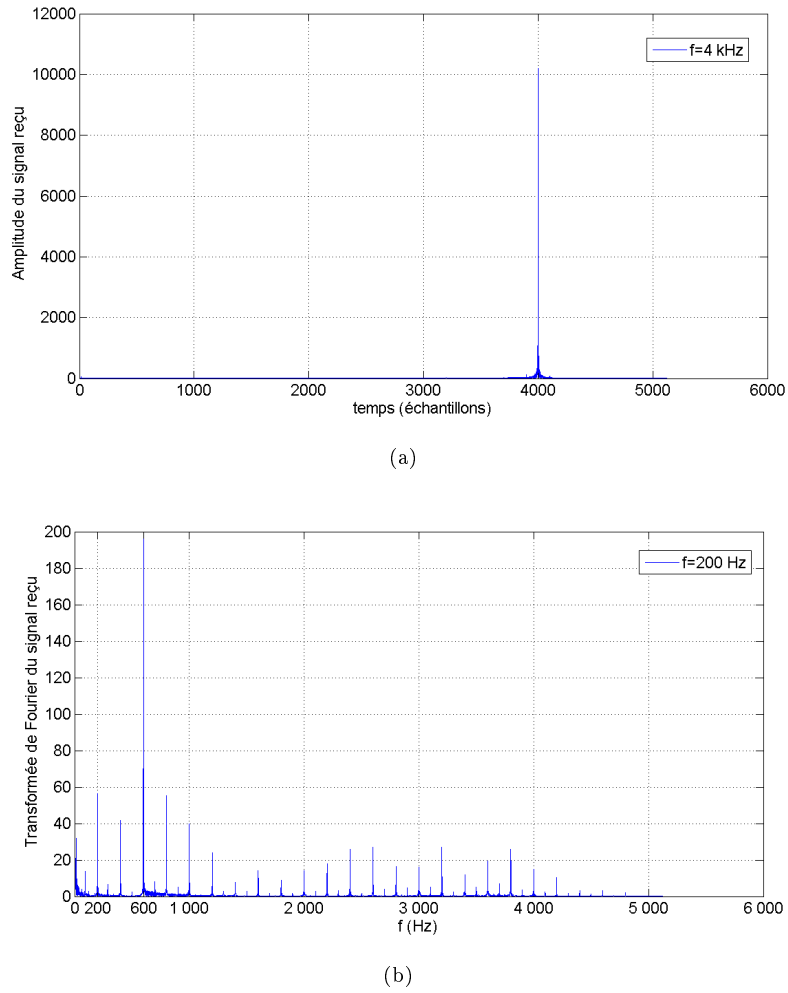


FIGURE 3.10: Module de la Transformée de Fourier du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.

L'acquisition des données entre le PC et la carte d'acquisition est effectuée via labview et le traitement de signal est réalisé sur MATLAB.

Avant de commencer notre campagne de mesures, nous avons effectué quelques tests préliminaires sans et avec l'opération de retournement temporel. Nous les présentons dans le paragraphe suivant.

3.4.2.3 Tests préliminaires

La première tâche à faire était de tester les haut-parleurs dont on dispose. Pour cela, nous émettons une sinusoïde de fréquence f sur un des quatre haut-parleurs. Le signal reçu est enregistré sur un microphone, situé à environ 10 cm de la source. Les valeurs de fréquence, f , considérées sont 200 Hz et 4 kHz. Sur la figure 3.10, nous visualisons les modules de la transformée de fourrier du signal reçu dans le cas de $f = 200$ Hz et $f = 4$ kHz. Les premiers échantillons du signal reçu sont également représentés sur la figure 3.11.

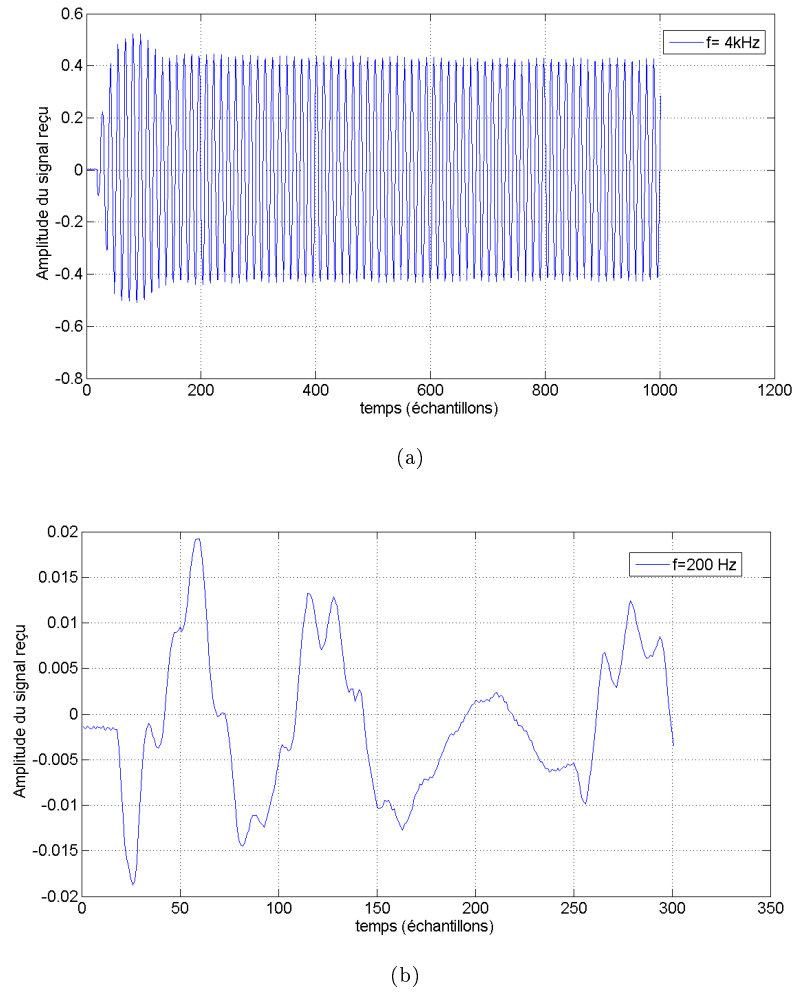


FIGURE 3.11: Premiers échantillons du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.

Nous observons une raie à $f = 4 \text{ kHz}$. Pour $f = 200 \text{ Hz}$, des harmoniques s'ajoutent à la raie de 200 Hz. Par ailleurs, l'allure temporelle du signal reçu, représentée sur la figure 3.11-b pour $f = 200 \text{ Hz}$ est déformée : Elle ne correspond plus à une sinusoïde. Nous en déduisons que ces haut-parleurs ne sont pas utiles pour notre expérimentation.

Dès lors, nous commandons quatre nouveaux haut-parleurs, de marque Visaton, de 8 cm à blindage magnétique avec membrane en cellulose et moulure de caoutchouc inversée. La réponse en fréquence des haut-parleurs est très équilibrée et leur bande passante est de 70 Hz à 20 kHz. La figure 3.12 reporte leur réponse en fréquence et en impédance (ou en anglais frequency and impedance response). Sur la figure 3.13, nous visualisons les modules de la transformée de fourrier du signal reçu dans le cas de $f = 200 \text{ Hz}$ et $f = 4 \text{ kHz}$. Les premiers échantillons du signal reçu sont également représentés sur la figure 3.14. Nous observons des raies à 200 Hz et 4 kHz, fréquences des porteuses. Les signaux reçus gardent leur forme initiale.

Le 2ème test consistait à transmettre une séquence de Gold modulée aux fréquences

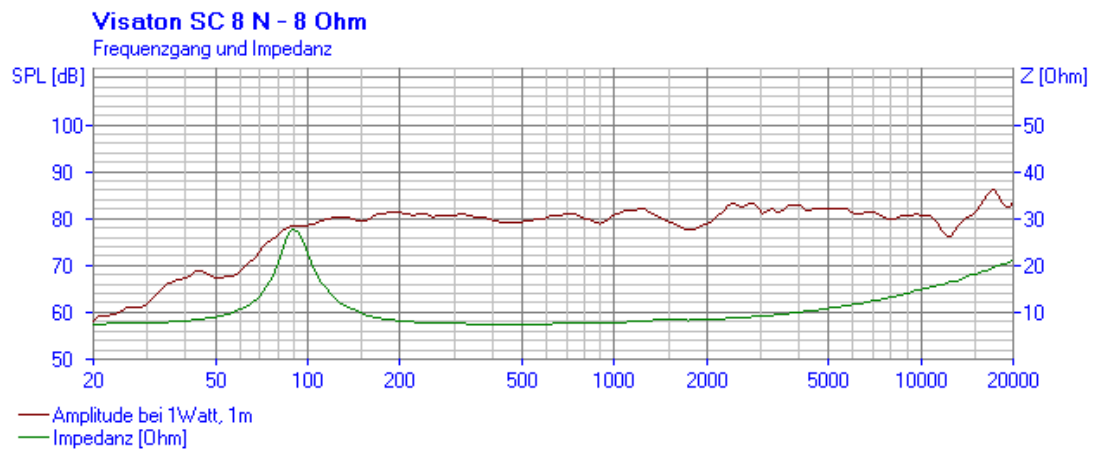
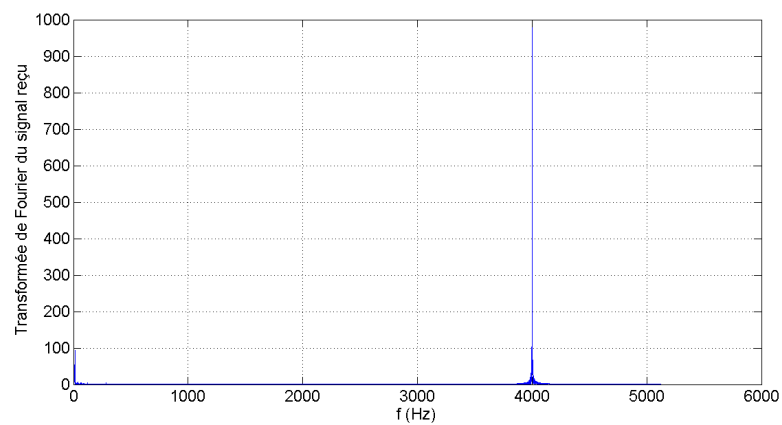
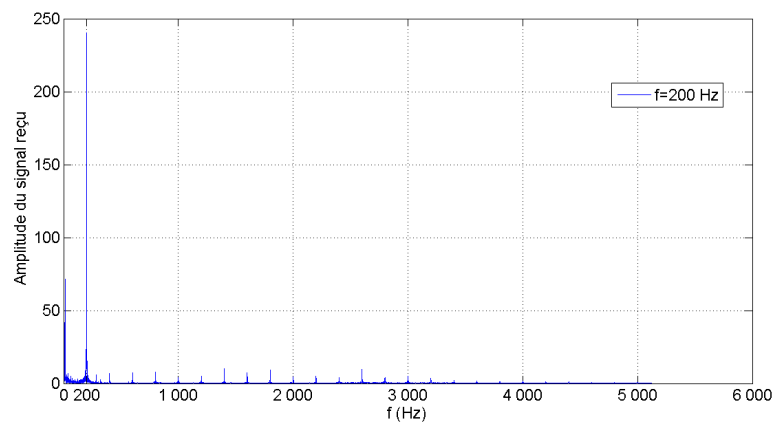


FIGURE 3.12: Réponse en fréquence et en impédance (Frequency and Impedance response) du haut-parleurs utilisé [44].



(a)



(b)

FIGURE 3.13: Module de la transformée de Fourier du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.

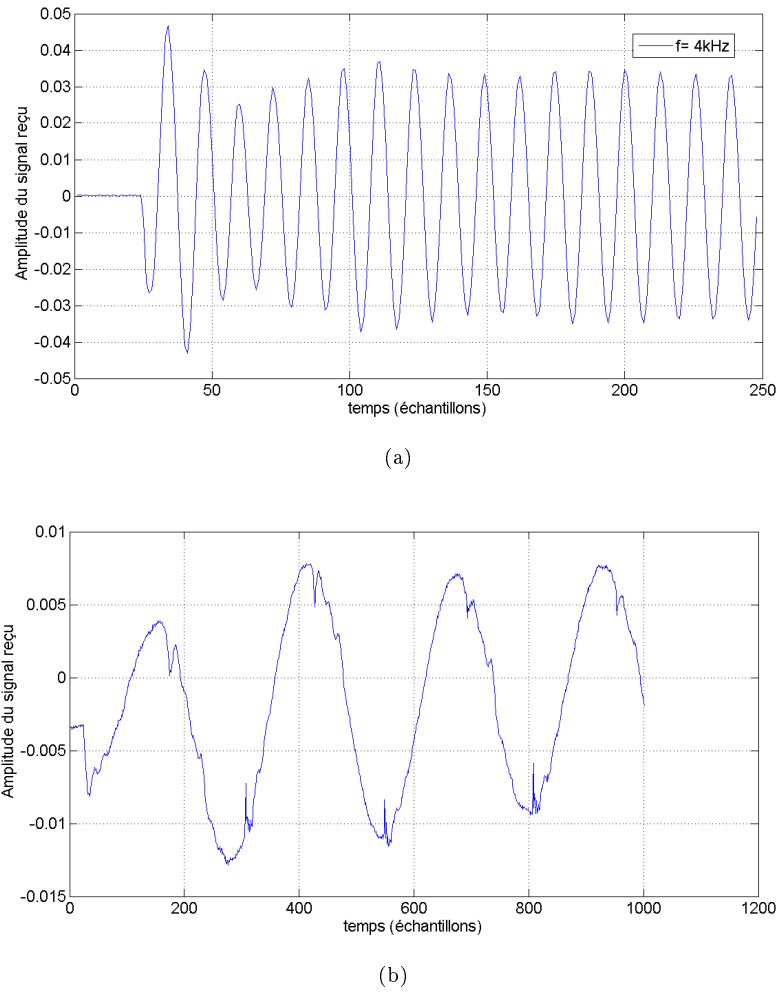


FIGURE 3.14: Premiers échantillons du signal reçu : (a) 4 kHz, (b) 200 Hz.

de 200 Hz et 4 kHz. La source est maintenue à une distance de 10 cm du récepteur. Les résultats, présentés sur la figure 3.15, montrent que le pic à $f = 4$ kHz est plus prononcé que celui à $f = 200$ Hz. Ceci est dû au fait que la réponse du haut-parleur n'est pas parfaitement plate.

Dans un troisième test, nous avons placé le microphone au centre de la pièce. Un des quatre haut-parleurs émet une séquence de Gold modulée aux fréquences 200 Hz et 4 kHz. Le signal reçu est retourné temporellement via Matlab. Le signal ainsi obtenu est émis simultanément par les quatre haut-parleurs. Nous reportons à la figure 3.16 la valeur absolue de la transformée de fourrier du signal reçu. Nous observons que la raie à 4 kHz est prononcée alors que celle à 200 Hz n'est plus visible. Cette atténuation est due à l'influence de la réponse en fréquence du haut-parleur mais également à la propagation du signal. Par conséquent, nous compensons expérimentalement les différentes porteuses composant le signal : l'amplitude de la porteuse de 4 kHz est diminuée par un facteur de 30.

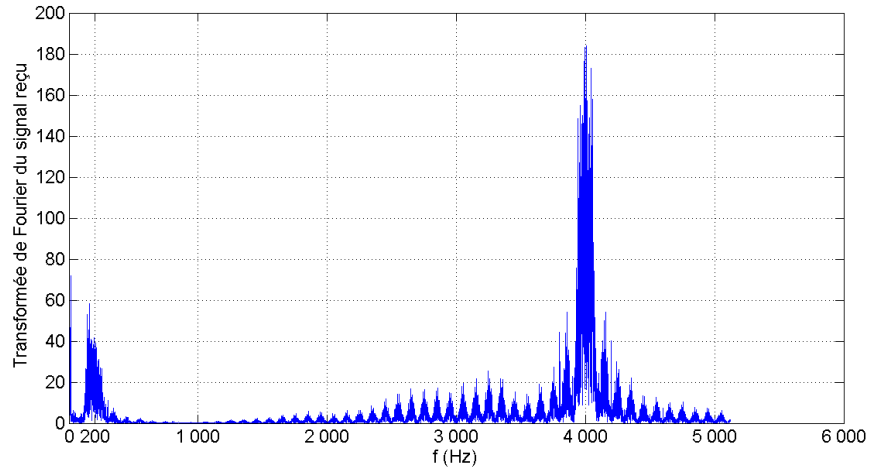


FIGURE 3.15: Module de la Transformée de Fourier du signal reçu à 10 cm du microphone, $f \in \{200Hz, 4kHz\}$.

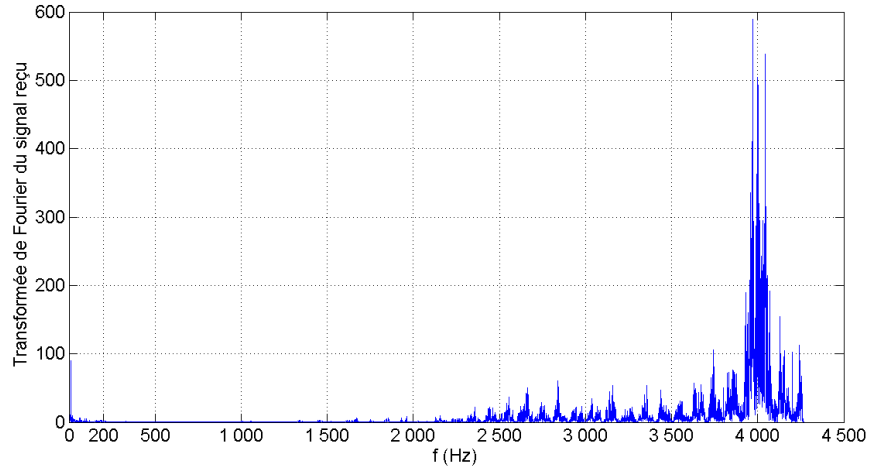


FIGURE 3.16: Module de la Transformée de Fourier du signal reçu, $f \in \{200Hz, 4kHz\}$.

Dans la suite, nous présentons les diagrammes de corrélation spatiale des deux sources $S1$ et $S2$, de positions respectives $(2.5m, 1.5m, 1.52m)$ et $(2m, 2m, 1.52m)$, obtenus avec la basse et la haute fréquence.

3.4.2.4 Digrammes de corrélation spatiale

L'allure des diagrammes obtenus en expérimentation (figures 3.17, 3.18 ,3.19 et 3.20) est similaire à celle des digrammes obtenus en simulation : Pour $f = 200$ Hz, les diagrammes sont plats alors que, pour $f = 4$ kHz, on observe un pic à la source et des pics prématurés partout dans la zone.

Comme pour les simulations, nous discutons, dans le paragraphe suivant, le choix de la valeur initiale de la température et le nombre de paliers de la méthode de recuit

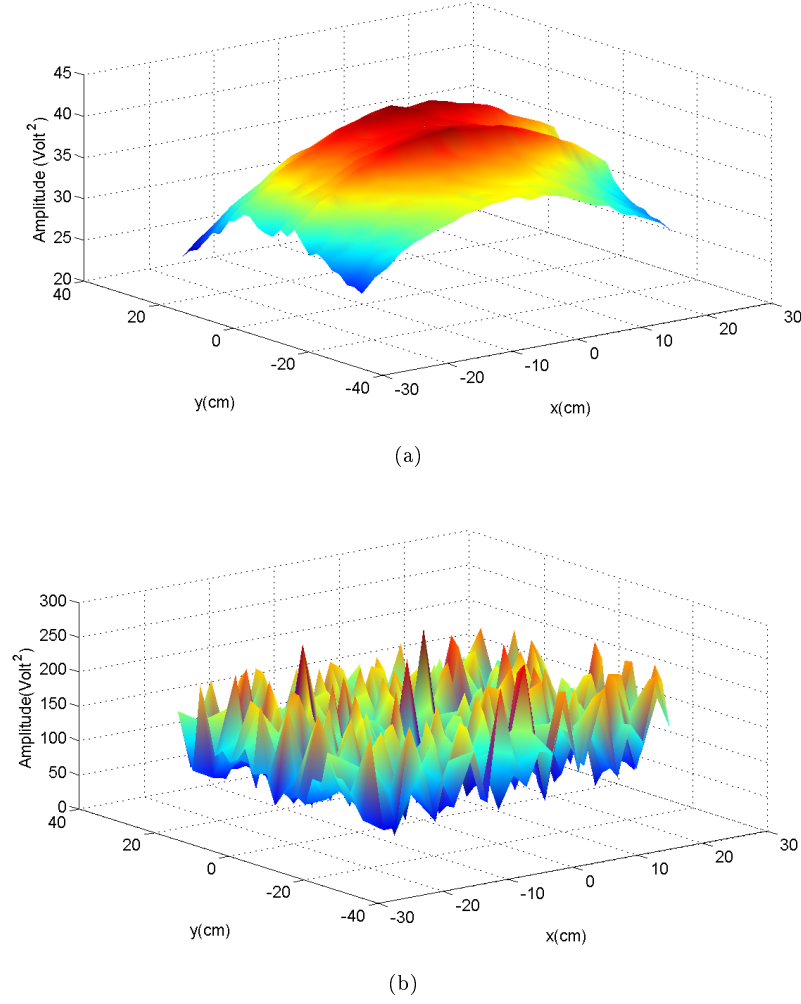


FIGURE 3.17: Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S1$:
(a) 200 Hz, (b) 4 kHz.

simulé pour chacune des deux sources. Nous renvoyons la précision de localisation pour chaque position de source ainsi que le nombre moyen de déplacements aboutissant à cette précision.

3.4.2.5 Réglage des paramètres du recuit simulé

Nous réglons les paramètres du recuit simulé pour chacune des deux sources. Rappelons que le recuit simulé a été seulement utilisé pour la basse fréquence. Pour la haute fréquence, le récepteur se déplace régulièrement, vu que la zone de recherche est réduite et qu'au voisinage de la source, il y a des pseudo-pics. En effet, pour surmonter le problème des pseudo-pics, le recuit simulé doit commencer à une température élevée, ce qui augmentera le nombre de déplacements de la source. Ce nombre pourrait dépasser le nombre de déplacements obtenu si le récepteur se déplace régulièrement dans toute la zone d'intérêt.

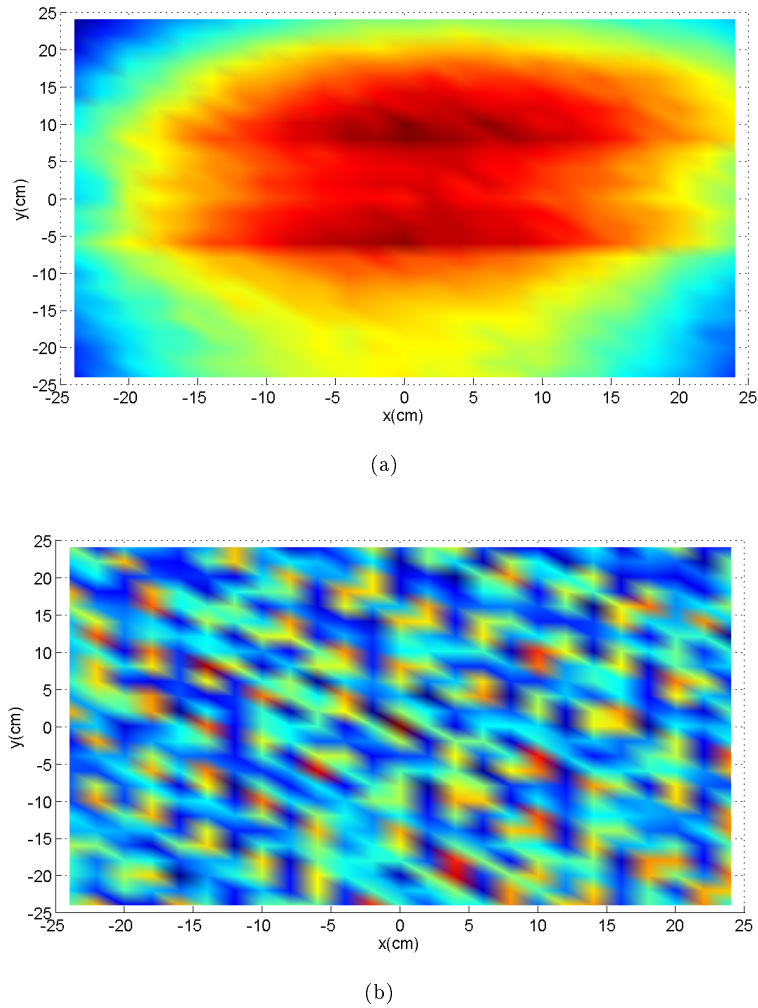


FIGURE 3.18: Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S1$: (a) 200 Hz, (b) 4 kHz.

Réglage des paramètres du recuit simulé pour la source $S1$

Choix de la valeur initiale de la température Nous faisons varier la valeur initiale de la température T en fixant le nombre de paliers à 4. Nous considérons les valeurs suivantes de T : 0, 0.01, 0.1, 1, 10 et 100. Pour $T = 0$, nous considérons un seul palier de température. Rappelons qu'à cette valeur de température (i.e., $T = 0$), le recuit simulé correspond à un algorithme de descente. La précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec $f = 200$ Hz est reportée dans la figure 3.21 pour différentes valeurs de T . La précision de localisation de la source $S1$ pour une erreur de 0 cm est illustrée dans le tableau 3.8.

Nous obtenons la même précision pour $T = 0$ et $T = 0.01$. En augmentant T de 0 à 0.1, on observe une augmentation de 10% en précision. Celle-ci se dégrade pour des valeurs de T assez élevées. Pour expliquer ces résultats, nous reportons dans le tableau 3.9 le nombre moyen de bonnes solutions ainsi que celui de mauvaises solutions acceptées.

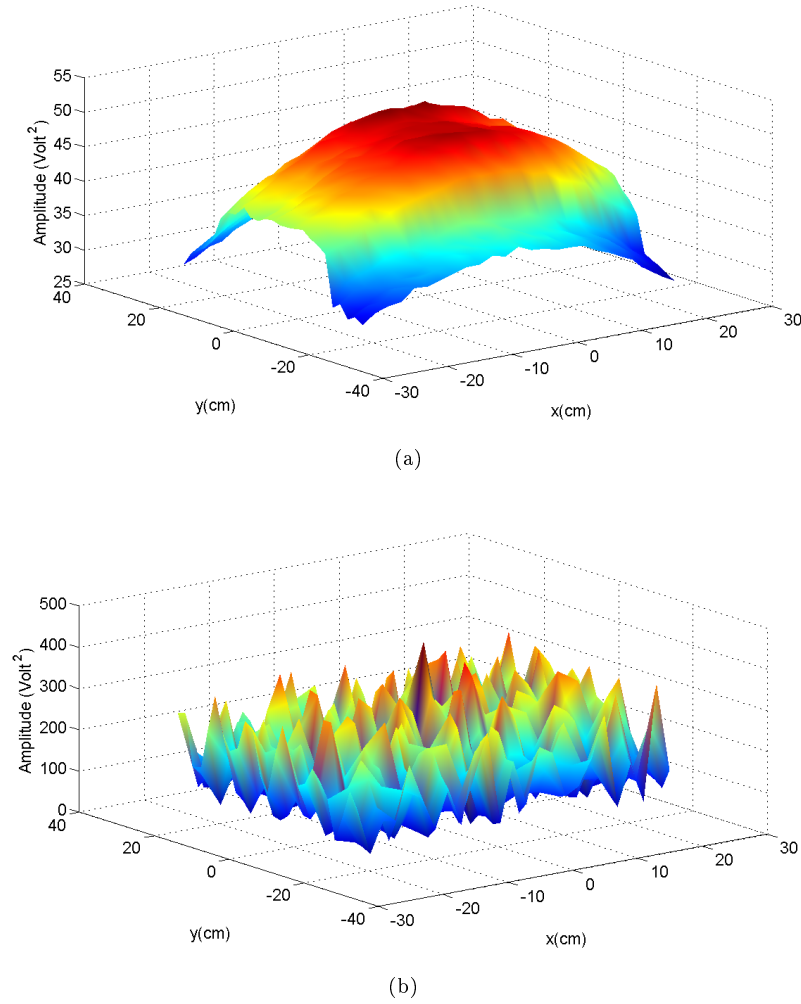


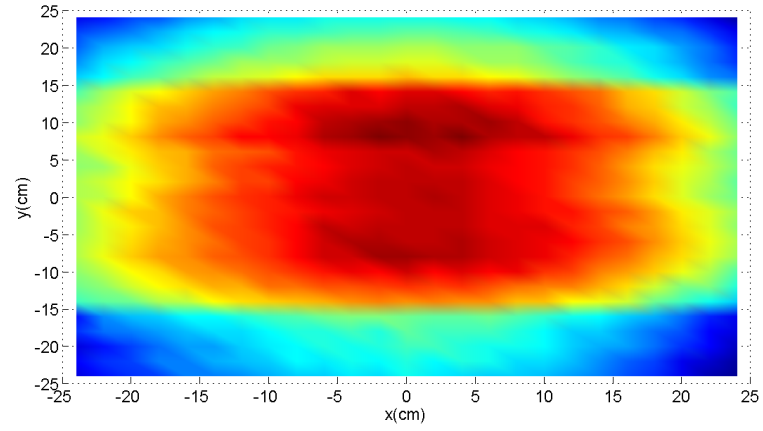
FIGURE 3.19: Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S2$:
(a) 200 Hz, (b) 4 kHz.

Température	0	0.01	0.1	1	10	100
N_p	1	4	4	4	4	4
Précision(%)	74.6	75.6	86.4	48.8	13	12

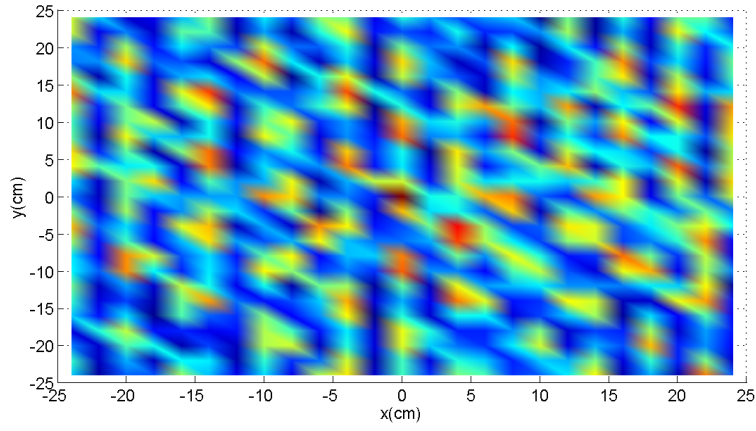
TABLE 3.8: Précision de localisation de la source $S1$ pour une erreur de 0 cm obtenue pour différentes valeurs de T .

Pour $T \in \{0, 0.01\}$, nous avons approximativement le même nombre de bonnes solutions acceptées, ce qui justifie la même valeur trouvée de précision. Le nombre de solutions dégradantes est nul pour ces valeurs de T . En effet, à T nulle (ou très faible), la probabilité d'acceptation donnée par $\exp(-\frac{\Delta E}{T})$ de ces solutions tend vers 0.

Pour $T \in \{1, 10, 100\}$, les nombres de mauvaises et de bonnes solutions sont plus élevés que ceux obtenus avec $T = 0.1$. Commencer à une température assez élevée induira une augmentation de la probabilité d'acceptation des configurations dégradantes et permettra alors d'accepter beaucoup de ces configurations. Ceci permettra également une



(a)



(b)

FIGURE 3.20: Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S2$: (a) 200 Hz, (b) 4 kHz.

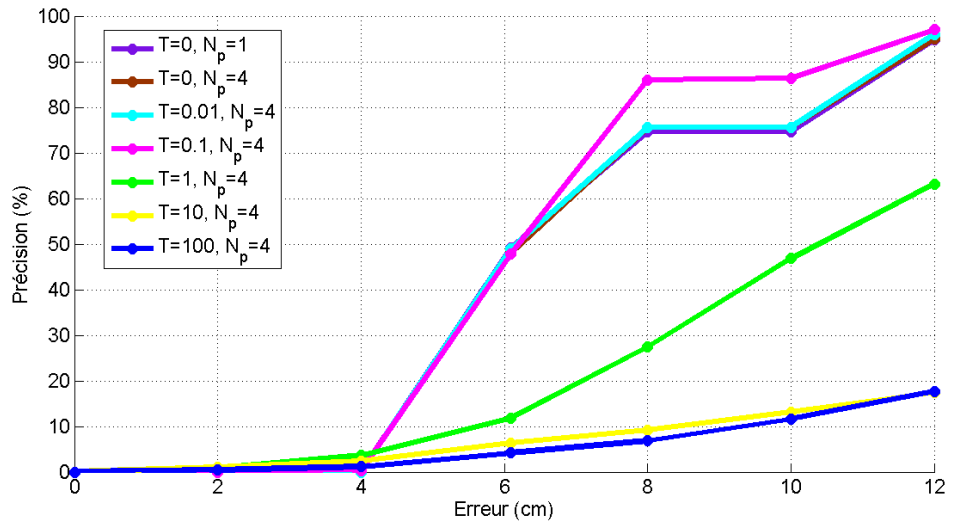


FIGURE 3.21: Précision en fonction de l'erreur de localisation pour différentes valeurs de température.

exploration de l'espace de recherche de solutions et entraînera alors une augmentation du nombre de bonnes solutions. Cependant, le nombre assez élevé de solutions dégradantes a induit une dégradation de la précision de localisation. Ceci montre que le système ne s'est pas encore stabilisé dans un optimum global. Pour améliorer la précision de localisation, il faut, dans ce cas, augmenter le nombre de paliers afin de réduire la probabilité d'acceptation des mauvaises solutions et tendre vers une stabilisation dans l'optimum global, ce qui nécessitera un temps assez élevé pour trouver la source et augmentera donc le délai de sa localisation.

A $T = 0.1$, le nombre de mauvaises solutions n'est pas nul, ce qui a permis d'explorer la zone de recherche et de ne pas rester emprisonné dans un optimum local. Il a également permis d'augmenter le nombre de bonnes solutions par rapport au cas de $T = 0$, où le nombre de solutions dégradantes est égal à zéro. Par ailleurs, contrairement aux cas de $T \in \{1, 10, 100\}$, ce petit nombre de mauvaises solutions a induit une amélioration de la précision de localisation : Des valeurs de précision de l'ordre de 86% et 86.40% sont respectivement obtenues pour une erreur inférieure ou égale à 8 cm pour la basse fréquence et 0 cm pour tout le système de localisation.

Température	0	0.01	0.1	1	10	100
N_p	1	4	4	4	4	4
Nbre moyen de bonnes solutions	9.2	9.5	10.4	66.9	120	120.8
Nbre moyen de mauvaises solutions	0	$\simeq 0$	1.4	61.9	120.1	121.1

TABLE 3.9: Nombre moyen de solutions acceptées obtenu avec différentes valeurs de T et $N_p \in \{1, 4\}$.

Nous illustrons, dans le tableau 3.10, le nombre moyen de déplacements pour $T \in \{0, 0.01, 0.1, 1, 10, 100\}$ et pour $N_p \in \{1, 4\}$. Nous observons que le nombre de déplacements augmentent avec la valeur de température T . En effet, comme mentionné précédemment, l'augmentation de la température T entraînera une augmentation de la probabilité d'acceptation des configurations dégradantes qui, à son tour, induira une augmentation du nombre de déplacements.

En conclusion, la meilleure précision de localisation est obtenue avec $T = 0.1$. Remarquons que la valeur de T choisie en expérimentations est différente de celle trouvée en simulations. En effet, les signaux émis dans le cas de simulations et dans le cas des expérimentations n'avaient pas la même amplitude.

Température	0	0.01	0.1	1	10	100
N_p	1	4	4	4	4	4
Nbre moyen de déplacements	37.2	85.5	81.5	243	259.5	243.9

TABLE 3.10: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de T , $N_p \in \{1, 4\}$ et $f = 200$ Hz.

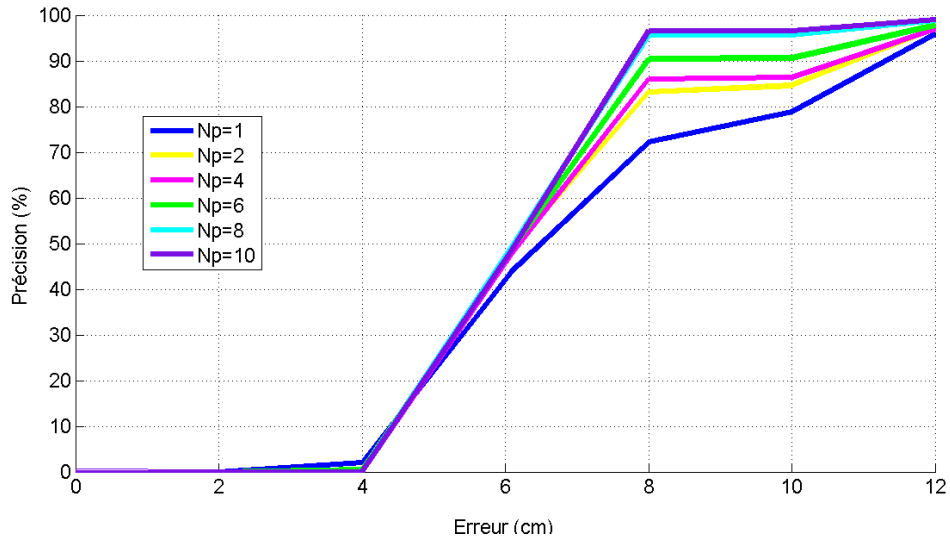


FIGURE 3.22: Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenu avec différentes valeurs de N_p et $T = 0.1$.

Choix du nombre de paliers Dans un premier temps, nous faisons varier le nombre de paliers de 2 à 10 par pas de 2, tout en fixant la valeur initiale de la température T à 0.1. Nous reportons, dans la figure 3.22, la précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue à la basse fréquence et nous illustrons, dans le tableau 3.11, la précision pour une erreur de 0 cm obtenue avec la méthode proposée, et ce pour les différentes valeurs de N_p et pour $T = 0.1$. Nous constatons que la précision de localisation pour une erreur

N_p	1	2	4	6	8	10
Précision (%)	76	84	86.40	90.60	95.80	96.60

TABLE 3.11: Précision de localisation de la source $S1$ pour une erreur de 0 cm obtenue pour différentes valeurs de N_p et $T = 0.1$.

de 0 cm s'améliore en augmentant la valeur de N_p et se stabilise à partir de $N_p = 8$. En effet, augmenter le nombre de paliers permet de fouiller encore plus l'espace de solutions en diminuant la probabilité d'acceptation des configurations dégradantes.

Dans un second temps, nous reportons dans le tableau 3.12 le nombre moyen de déplacements pour $T = 0.1$ et pour $N_p \in \{1, 2, 4, 6, 8, 10\}$. Nous remarquons que le nombre moyen de déplacements pour les différentes valeurs de N_p reste inférieur à celui qu'on pourrait obtenir si le récepteur se déplace régulièrement dans toute la zone et qui vaut 625 positions.

Dans ce qui suit, nous déterminons empiriquement la valeur initiale de la température ainsi que le nombre de paliers donnant la meilleure précision de localisation de la source $S2$, située au milieu de la salle.

N_p	1	2	4	6	8	10
Nbre moyen de déplacements	38.1	55.6	81.5	123.2	156.8	188.6

TABLE 3.12: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de N_p , $T = 0.1$ et $f = 200$ Hz.

Réglage des paramètres de recuit simulé pour la source $S2$

Choix de la valeur initiale de la température Comme pour le cas de la source $S1$, nous faisons varier la valeur initiale de la température T en fixant le nombre de paliers N_p à 4. Pour $T = 0$, nous fixons N_p à 1. La précision de localisation pour une erreur de 0 cm est reportée dans le tableau 3.13 et ce pour différentes valeurs de T et pour $N_p \in \{1, 4\}$. Nous observons que la méthode du recuit simulé avec $T = 0$ permet une

Température	0	0.1	1	10
N_p	1	4	4	4
Précision (%)	100	100	59	15.2

TABLE 3.13: Précision de localisation de la source $S2$ pour une erreur de 0 cm obtenue avec différentes valeurs de T et $N_p \in \{1, 4\}$.

précision de 100% pour une erreur de 0 cm. En comparant les diagrammes de corrélation des deux sources $S1$ et $S2$ obtenus avec $f = 200$ Hz, nous remarquons que celui de $S2$ est plus symétrique. Le diagramme de $S1$ contient plus de variations d'amplitude (de pics). Ces bonnes performances sont maintenues à $T = 0.1$. Cependant, aux valeurs de $T \in \{1, 10\}$, la précision s'est dégradée à cause du nombre moyen de solutions dégradantes (voir tableau 3.14).

Nous reportons, dans le tableau 3.15, le nombre moyen de déplacements du récepteur.

Température	0	0.1	1	10
N_p	1	4	4	4
Nbre moyen de bonnes solutions	9.5	12.3	52	118.2
Nbre moyen de mauvaises solutions	0	3.2	58.2	118

TABLE 3.14: Nombre moyen de solutions acceptées obtenu avec différentes valeurs de T et $N_p \in \{1, 4\}$.

Les valeurs sont proches de celles obtenues avec la source $S1$. Le meilleur compromis entre délai de localisation et précision est obtenu pour la source $S2$ avec $T = 0$. La valeur de $T = 0.1$ offre la même précision avec un délai de localisation acceptable.

Choix du nombre de paliers Dans le but d'utiliser les mêmes paramètres pour les deux sources $S1$ et $S2$, nous fixons la température à 0.1 et nous faisons varier le nombre de paliers. Le tableau 3.16 donne la précision obtenue avec le système proposé pour

Température	0	0.1	1	10
N_p	1	4	4	4
Nbre moyen de déplacements	36.5	94.9	219.3	265.4

TABLE 3.15: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu pour différentes valeurs de T , $N_p \in \{1, 4\}$ et $f = 200$ Hz.

différentes valeurs de N_p et pour $T = 0.1$. Le nombre moyen de déplacements est illustré dans le tableau 3.17. Nous obtenons la même précision pour toutes les valeurs de N_p .

N_p	1	2	4	6	8	10
Précision (%)	98.40	99.6	100	100	100	100

TABLE 3.16: Précision de localisation de la source $S2$ pour une erreur de 0 cm obtenu avec différentes valeurs de N_p et $T = 0.1$.

L'augmentation du nombre de paliers doit améliorer la précision de localisation. Pour le cas de la source $S2$, une précision de l'ordre de 100% est déjà atteinte à $N_p = 1$.

N_p	1	2	4	6	8	10
Nbre moyen de déplacements	39.3	58.1	94.9	131.2	167	202.4

TABLE 3.17: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différentes valeurs de N_p , $T = 0.1$ et $f = 200$ Hz.

Les résultats obtenus pour les deux sources $S1$ et $S2$ confirment les résultats obtenus par simulations. Par ailleurs, le nombre moyen de déplacements du récepteur nécessaire pour localiser ou atteindre la source est nettement inférieur au nombre total de positions dans toute la zone d'intérêt.

3.5 Délai de localisation du système proposé

Dans ce qui précède, nous avons évalué, par simulations et par expérimentations, les performances de notre système de localisation en termes d'erreur et de précision de localisation pour $M_f = 2$. Le délai de localisation a été également donné. Nous nous intéressons, dans cette partie, à la réduction du délai de localisation en augmentant le pas de déplacement aussi bien pour la basse fréquence que pour la haute fréquence. Une autre solution possible consiste à augmenter le nombre de fréquences, M_f , et à ajouter une fréquence entre 200 Hz et 4 kHz. Nous présentons, dans ce qui suit, les résultats trouvés par simulations.

3.5.1 Réduction du pas de déplacements

Cette solution consiste à réduire le pas de déplacement pour la basse fréquence et la haute fréquence.

3.5.1.1 Réduction du pas de déplacements en basse fréquence

La variation lente de l'amplitude de la corrélation spatiale pour $f = 200$ Hz nous a motivé à augmenter le pas de déplacement du récepteur. Ayant choisi T égale à 100 et N_p égale à 4 paliers, nous évaluons la précision moyenne et la précision par position pour différents pas de déplacement du récepteur. L'objectif étant de réduire le temps d'estimation de la position de la source. Nous considérons les valeurs suivantes du pas de déplacement pour la basse fréquence : 1 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm et 10 cm. Nous reportons, dans le tableau 3.18, la précision moyenne obtenue avec ces valeurs de pas de déplacement et avec $T = 100$ et $N_p = 4$.

La précision moyenne pour un pas de 6 cm est égale à celle obtenue avec un pas de 1

Pas	1	6	7	8	10
Précision(%)	88.73	89.97	84.55	81.88	73.22

TABLE 3.18: Précision pour une erreur de localisation de 1 cm obtenu avec différents pas de déplacement, $T = 100$ et $N_p = 4$.

cm. Cependant, d'après le tableau 3.19, la précision par position obtenue avec un pas de 6 cm est meilleure que celle obtenue avec un pas de 1 cm pour la plupart des sources. Se déplacer avec des pas différents permettra au récepteur d'emprunter des chemins différents. Avec un pas de 6 cm, le récepteur a parcouru de meilleurs chemins qu'avec le pas de 1 cm. Cependant, pour un pas ≥ 7 cm, la précision est légèrement dégradée. En effet, se déplacer avec un pas grossier peut empêcher le récepteur de s'approcher du voisinage de la source et dégrade alors la précision de localisation. En ce qui concerne

Numéro de la source	Position de la source	$pas = 1$ cm	$pas = 6$ cm
1	(1.96 m, 2.08 m, 1.5 m)	100	100
2	(2.73 m, 1.93 m, 1.5 m)	83.4	88
3	(2.47 m, 1.8 m, 1.5 m)	95	97.60
4	(2.72 m, 1.14 m, 1.5 m)	89.8	91.20
5	(2.24 m, 2.51 m, 1.5 m)	91.2	95
6	(1.48 m, 1.72 m, 1.5 m)	83.4	90.80
7	(2.25 m, 2.85 m, 1.5 m)	85.4	83.80
8	(1.31 m, 2.22 m, 1.5 m)	88	75
9	(2.21 m, 2.71 m, 1.5 m)	82.4	88.40

TABLE 3.19: Précision par position pour une erreur de 1 cm obtenu avec différents pas de déplacement, $T = 100$ et $N_p = 4$.

le nombre moyen de déplacements (voir tableau 3.20), nous observons une diminution significative de ce nombre par rapport à celui obtenu avec un pas de 1 cm.

Pas	1	6	7	8	10
Nbre moyen de déplacements	193	83	79.6	77	74

TABLE 3.20: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec différents pas de déplacement, $T = 100$, $N_p = 4$ et $f = 200$ Hz.

D'autre part, se déplacer avec un pas fin comme celui de 1 cm permet au récepteur de fouiller tout l'espace de recherche, ce qui augmente le risque de croiser des optimums locaux. On pourrait penser qu'agrandir le pas pourrait permettre au récepteur de sauter quelques uns. De ce fait, nous évaluons les performances de notre système avec un pas de 6 cm en utilisant un seul palier (i.e., $N_p = 1$) et en considérant la valeur 0 pour T . Nous reportons, dans les tableaux 3.21 et 3.22, la précision moyenne et la précision par position obtenues pour une erreur inférieure ou égale à 1 cm avec $T = 0$, $N_p = 1$ et un pas de déplacement de 6 cm. Le nombre moyen de déplacements du récepteur est reporté dans le tableau 3.23.

T	0
Précision (%)	89.8

TABLE 3.21: Précision moyenne pour une erreur de localisation de 1 cm, $T = 0$, $N_p = 1$ et pas=6 cm.

Numéro de la source	Position de la source	$T = 0$
1	(1.96 m, 2.08 m, 1.5 m)	100
2	(2.73 m, 1.93 m, 1.5 m)	87
3	(2.47 m, 1.8 m, 1.5 m)	97.40
4	(2.72 m, 1.14 m, 1.5 m)	92
5	(2.24 m, 2.51 m, 1.5 m)	94.80
6	(1.48 m, 1.72 m, 1.5 m)	89.80
7	(2.25 m, 2.85 m, 1.5 m)	84.40
8	(1.31 m, 2.22 m, 1.5 m)	73.80
9	(2.21 m, 2.71 m, 1.5 m)	89.20

TABLE 3.22: Précision par position pour une erreur de 1 cm, $N_p = 1$, $T = 0$ et pas=6 cm.

T	0
Nbre moyen de déplacements	35.03

TABLE 3.23: Nombre moyen de déplacements du récepteur obtenu avec $N_p = 1$, $T = 0$, pas=6 cm et $f = 200$ Hz.

Les bonnes performances obtenues avec $T = 0$ montrent que l'augmentation du pas de déplacement a permis au récepteur de sauter plusieurs optimums locaux. En conclusion, le meilleur compromis entre délai et précision de localisation est atteint avec un pas de 6 cm et pour $T = 0$ et $N_p = 1$: Une précision moyenne de 90% pour une erreur inférieure à 1 cm et un nombre moyen de déplacements de l'ordre de 35 sont obtenus avec ces valeurs de paramètres. Cependant, à cette valeur du nombre de déplacements, il faut ajouter 289 positions dues au déplacement du récepteur en haute fréquence. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la réduction de ce nombre.

3.5.1.2 Réduction du pas de déplacements en haute fréquence

Nous supposons que le récepteur se déplace, avec un pas de 1 cm, dans une zone de largeur 4 cm \times 4 cm centrée sur la position estimée en basse fréquence. Pour le reste de la zone réduite, il se déplace avec un pas de 2 cm. Le nombre de déplacements en haute fréquence devient alors égal à 121. Le tableau 3.24 illustre la précision par position pour des erreurs inférieures à 1 cm et 1.5 cm obtenue avec un pas de 6 cm en basse fréquence et avec $T = 0$ et $N_p = 1$.

Numéro de la source	Position de la source	$Erreur \leq 1cm$	$Erreur \leq 1.5cm$
1	(1.96 m, 2.08 m, 1.5 m)	95	95
2	(2.73 m, 1.93 m, 1.5 m)	75.60	87.80
3	(2.47 m, 1.8 m, 1.5 m)	77.40	97.40
4	(2.72 m, 1.14 m, 1.5 m)	72	83.20
5	(2.24 m, 2.51 m, 1.5 m)	67	94
6	(1.48 m, 1.72 m, 1.5 m)	59.20	84.40
7	(2.25 m, 2.85 m, 1.5 m)	53	84.20
8	(1.31 m, 2.22 m, 1.5 m)	67	85.60
9	(2.21 m, 2.71 m, 1.5 m)	70.40	89.80

TABLE 3.24: Précision par position pour des erreurs de 1 cm et 1.5 cm, $N_p = 1, T = 0$, pas = 6 cm.

Nous observons une dégradation de la précision pour une erreur de 1 cm. Cependant, la précision obtenue pour une erreur de 1.5 cm est proche de celle obtenue pour une erreur de 1 cm avec un pas de déplacement de 1 cm dans toute la zone réduite (i.e., zone de recherche de solutions en haute fréquence) (voir tableau 3.22).

3.5.1.3 Réduction du délai de localisation par ajout d'une nouvelle échelle

Le nombre assez élevé de déplacements de récepteur est du à son déplacement régulier dans une zone de dimensions plus au moins larges à la haute fréquence. Rappelons que nous avons opté pour cette méthode car la méthode de recuit simulé nécessiterait un

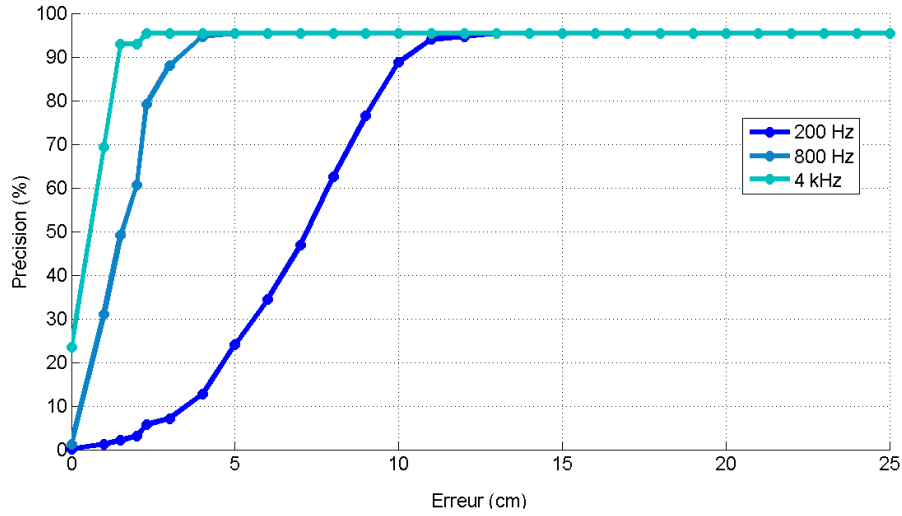


FIGURE 3.23: Précision en fonction de l'erreur de localisation obtenue avec $M_f = 3$.

nombre plus élevé de déplacement à cause de quelques pics prématurés apparaissant dans la zone réduite. Dans cette partie, nous ajoutons une échelle intermédiaire entre la basse fréquence (i.e., $f=200$ Hz) et la haute fréquence (i.e., $f = 4$ kHz) afin d'éviter ces pics prématurés et de réduire encore plus la zone de recherche à l'échelle la plus fine. Nous avons gardé les mêmes valeurs de T et du pas de déplacement obtenues pour $f = 200$ Hz : une température nulle et un pas de déplacement de 6 cm. Pour l'échelle intermédiaire, nous avons fixé f à 800 Hz et nous avons maintenu la valeur de 4 kHz pour l'échelle fine. Les dimensions de la zone de recherche de la source pour une échelle donnée sont déterminées en fonction de la précision de localisation obtenue avec l'échelle qui lui est inférieure. Les pas de déplacement pour $f = 800$ Hz et $f = 4$ kHz sont respectivement fixés à 4 cm et 2 cm. La température est maintenue nulle pour $f = 800$ Hz.

Nous reportons à la figure 3.23 la précision de localisation obtenue avec les trois échelles : 200 Hz, 800 Hz et 4 kHz. A l'échelle grossière (i.e., $f = 200$ Hz), le système permet une erreur de 10 cm avec une précision de 88.85%. A une échelle plus fine (i.e. $f \in \{200\text{Hz}, 800\text{Hz}\}$), une erreur de 3 cm est obtenue avec environ 88% de réalisations. Par conséquent, la dimension de la zone de recherche de la source à l'échelle intermédiaire est fixée à 2×10 cm. A l'échelle fine, la largeur de cette zone est réduite à 2×3 cm. Le système de localisation ainsi présenté permet une erreur de localisation de 1.5 cm pour 92.8% des réalisations. Ce résultat est atteint avec seulement 70 déplacements du récepteur.

La précision par position pour des erreurs inférieures à 1 cm, 1.5 cm et 2.3 cm est donnée dans le tableau 3.25. La précision par position pour une erreur inférieure à 1.5 cm est assez proche de celle obtenue avec deux échelles et 121 déplacements en haute fréquence. L'ajout d'une nouvelle échelle a alors permis d'obtenir le meilleur compromis entre précision et délai de localisation : une précision de 92% pour une erreur inférieure

Numéro de la source	Position de la source	$Erreur \leq 1cm$	$Erreur \leq 1.5cm$	$Erreur \leq 2.3cm$
1	(1.96 m, 2.08 m, 1.5 m)	75.60	100	100
2	(2.73 m, 1.93 m, 1.5 m)	66.40	90.6	90.60
3	(2.47 m, 1.8 m, 1.5 m)	76.60	100	100
4	(2.72 m, 1.14 m, 1.5 m)	48.40	71.00	94.00
5	(2.24 m, 2.51 m, 1.5 m)	71.20	98.00	98.00
6	(1.48 m, 1.72 m, 1.5 m)	75.40	96.20	96.20
7	(2.25 m, 2.85 m, 1.5 m)	69.40	92.40	92.40
8	(1.31 m, 2.22 m, 1.5 m)	68.00	93.60	93.60
9	(2.21 m, 2.71 m, 1.5 m)	73.40	94.00	94.00

TABLE 3.25: Précision par position pour des erreurs de 1 cm, 1.5 cm et 2.3 cm, obtenue avec $M_f = 3$.

à 1.5 cm est atteinte avec seulement 70 déplacements du récepteur. Dans le chapitre suivant, nous opterons pour cette solution : La valeur de M_f sera choisie strictement supérieure à 2.

3.6 Conclusion

Nous venons de présenter un système de localisation destiné aux environnements intérieurs. Ce système est basé sur la méthode de retournement temporel [4]. Il permet à un récepteur d'atteindre sa destination souhaitée ou de localiser une source souhaitant se positionner.

Dans un premier temps, la localisation a été effectuée à deux échelles : une échelle grossière et une échelle fine. L'erreur et la précision de localisation ont été évaluées par simulations et par expérimentations. Les résultats expérimentaux ont confirmé les résultats de simulations et ont montré que le système permet une erreur de 1 cm pour environ 87% des réalisations.

Dans une deuxième partie, nous nous sommes intéressés à réduire le délai de localisation de la source. Nous avons constaté que l'ajout d'une échelle intermédiaire permet d'obtenir un bon compromis entre précision et délai nécessaire à l'estimation de la position. En effet, avec seulement deux échelles, quelques pics prématurés apparaissent dans la zone réduite de recherche de la source. La méthode de recuit simulé dans ce cas induirait un nombre élevé de déplacements du récepteur car elle devrait commencer à une température élevée afin d'éviter ces pics prématurés. Le déplacement régulier du récepteur dans la zone réduite a généré un délai de localisation assez important à cause des dimensions de la zone réduite. L'ajout d'une nouvelle échelle a alors permis d'éviter les pics prématurés et de réduire les dimensions de la zone réduite à l'échelle fine.

Toutefois, le système ainsi présenté permet de localiser une seule source à un instant donné. Le chapitre suivant sera alors consacré à la localisation simultanée de plusieurs sources avec différentes échelles de précision.

Chapitre 4

Localisation simultanée des sources par retournement temporel

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le principe de notre système de localisation multi-échelle. Ce système présente de bonnes performances en termes de précision de localisation et délai de localisation. Cependant, il permet de localiser ou d'atteindre une seule source à un instant donné. Dans le cas où plusieurs sources sont présentes, il est nécessaire de garantir une localisation simultanée de toutes ces sources.

Dans un contexte peu similaire, Mathias Fink et al [45] ont eu recours au retournement temporel itératif afin de détecter une cible parmi plusieurs. En effet, si le milieu contient deux cibles de réflectivité différentes, le retournement temporel des ondes réfléchies par les cibles génère deux ondes focalisant chacune sur une des deux cibles. L'onde de forte amplitude éclaire la cible ayant la plus forte réflectivité alors que, l'onde de faible amplitude éclaire la seconde cible. Dans ce cas, le procédé de retournement temporel peut être itéré. Après la première itération, la cible de faible réflectivité réfléchit une onde plus faible que celle réfléchie par la cible de forte réflectivité. Après un certain nombre d'itérations, le procédé converge et produit une onde focalisée sur la cible ayant la plus forte réflectivité. Dans le cas de plusieurs cibles, les signaux des cibles déjà détectées sont annulés à l'aide d'un filtre [46] et ce afin de détecter les autres cibles.

Une solution, adaptée à notre contexte, consiste à déployer la méthode d'accès multiple par répartition de code. Cette méthode permet à plusieurs sources de transmettre simultanément leurs signaux à la même fréquence porteuse.

Dans ce chapitre, nous décrivons le principe de notre système de localisation multi-sources et multi-échelles. Nous évaluons ses performances par simulations pour différentes valeurs du nombre de sources et nous les comparons à celles obtenues dans le cas d'une

seule source. Par ailleurs, nous décrivons les expérimentations, que nous avons menées dans une salle de réunion à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, afin de valider les résultats de simulations. Nous présentons le protocole expérimental, le matériel utilisé ainsi que les résultats trouvés.

Nous consacrons la deuxième partie de ce chapitre à la réduction de l'audibilité de notre signal de localisation. Nous présentons quelques éléments de la psycho-acoustique notamment l'anatomie de l'oreille et le seuil d'audition absolu. Nous décrivons par la suite la solution que nous proposons afin de réduire l'audibilité de notre signal de localisation et nous présentons les performances de notre système évaluées par simulations.

4.2 Système de localisation multi-échelle et multi-sources

Le système de localisation que nous avons décrit dans le chapitre précédent permet de localiser une source ou d'atteindre une destination avec différentes précisions et ce, en tirant profit de la dépendance du diagramme de corrélation spatiale par rapport à la fréquence. Le signal de la source est alors modulé à différentes valeurs de fréquences. Le récepteur, qui est à la recherche de la source, utilise d'abord la plus basse fréquence afin de localiser la source dans toute la zone d'intérêt avec une échelle grossière. Puis, il passe d'une fréquence à une autre, de valeur plus élevée, pour localiser la source avec une échelle plus fine dans une zone plus réduite.

Les résultats de simulations et d'expérimentations ont montré que ce système présente de bonnes performances en termes de précision de localisation et de délai de localisation. Cependant, ce système permet à ses utilisateurs d'atteindre la même destination à un instant donné. Dans le cas où les utilisateurs du système souhaitent atteindre différentes destinations, les signaux des différentes sources doivent être émis successivement.

Pour que le système soit simultanément utilisé par un nombre plus élevé d'utilisateurs, nous déployons la technique d'accès multiples par répartition de code. Chaque destination est identifiée par une source émettant un code de Gold unique. Ces codes sont émis simultanément dans le milieu de transmission. Les utilisateurs du système souhaitant atteindre la destination j , identifiée par le code de Gold noté S_j , démodulent le signal reçu et le corrélent avec le code de la source j . Au même instant, les utilisateurs du système souhaitant atteindre la destination i , identifiée par le code de Gold noté S_i , démodulent le signal reçu et le corrélent avec le code de la source i , $i \neq j$. Ils passent d'une fréquence à une autre jusqu'à localiser la source avec une bonne précision.

Afin d'expliquer le principe de ce système, nous considérons le cas de N sources qui émettent des signaux à une seule fréquence (i.e. $M_f = 1$). En notant par $S_j(t)$ le code émis par la source j placée en r_{s_j} , le signal, $R_i(t)$, reçu par le transducteur i du

miroir à retournement temporel situé en r_i est donné par :

$$R_i(t) = \sum_{j=1}^N S_j(t) \otimes h_{e_{j,i}}(r_{s_j}, r_i, t) \quad (4.1)$$

où $h_{e_{j,i}}(r_{s_j}, r_i, t) = \sum_k \alpha_{(j,i)_k} \times e^{-jw\tau_{(j,i)_k}} \delta(t - \tau_{(j,i)_k})$ est l'enveloppe complexe de la réponse impulsionnelle du canal de la source j au transducteur i . $\alpha_{(j,i)_k}$ et $\tau_{(j,i)_k}$ désignent respectivement l'atténuation et le retard du trajet k de la source j au transducteur i .

Après retournement temporel, le signal reçu à une position quelconque, r_r , est donné par :

$$Y_e(r_r, t) = \sum_i R_i^*(-t) \otimes h'_{e_i}(r_i, r_r, t) \quad (4.2)$$

$$Y_e(r_r, t) = \sum_i \sum_{j=1}^N S_j(-t) \otimes h_{e_{j,i}}^*(r_{s_j}, r_i, -t) \otimes h'_{e_i}(r_i, r_r, t) \quad (4.3)$$

où $h'_{e_i}(r_i, r_r, t) = \sum_l \gamma_{il} \times e^{-jw\theta_{il}} \delta(t - \theta_{il})$ est l'enveloppe complexe de la réponse impulsionnelle du canal entre le transducteur i et le récepteur, situé à la position r_r . γ_{il} et θ_{il} représentent respectivement l'atténuation et le retard du trajet l du transducteur i au récepteur.

En remplaçant dans l'équation 4.3, l'enveloppe complexe de la réponse impulsionnelle du canal $h'_{e_i}(r_i, r_r, t)$ par son expression, on peut écrire $Y_e(r_r, t)$ sous la forme :

$$Y_e(r_r, t) = \sum_i \sum_{j=1}^N \sum_{l,k} \alpha_{(j,i)_k} \times \gamma_{il} \times e^{jw(\tau_{(j,i)_k} - \theta_{il})} \times S_j(-t - \tau_{(j,i)_k} + \theta_{il}) \quad (4.4)$$

En corrélant le signal reçu avec le code $S_{j_0}(t)$ de la source j_0 , on obtient :

$$\begin{aligned} C_{Y_e, S_{j_0}}(r_r, t) &= \sum_i \sum_{l,k} \alpha_{(j_0,i)_k} \times \gamma_{il} \times e^{jw(\tau_{(j_0,i)_k} - \theta_{il})} \times A_{S_{j_0}}(-t - \tau_{(j_0,i)_k} + \theta_{il}) \\ &+ \sum_i \sum_{j=1, j \neq j_0}^N \sum_{l,k} \alpha_{(j,i)_k} \times \gamma_{il} \times e^{jw(\tau_{(j,i)_k} - \theta_{il})} \times I_{S_{j_0}, S_j}(-t - \tau_{(j,i)_k} + \theta_{il}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$A_{S_{j_0}}(t)$ désigne la fonction d'auto-corrélation de la séquence $S_{j_0}(t)$ et $I_{S_{j_0}, S_j}(t)$ la fonction d'inter-corrélation entre la séquence $S_{j_0}(t)$ et les séquences $(S_j(t))_{j \neq j_0, j \in [1, N]}$.

Deux facteurs peuvent dégrader notre système de localisation notamment l'interférence d'accès multiple et l'effet d'éblouissement. Le dernier est dû à la différence de puissance des signaux reçus des différentes sources. L'interférence d'accès multiple est causée par les propriétés d'inter-corrélation des codes puisque ces derniers ne sont pas parfaitement orthogonaux. Elle est dégradée par l'effet d'éblouissement. Pour remédier à ces deux facteurs, des systèmes de localisation déjà existants [20]-[21] ont contrôlé la

puissance émise en chaque point de mesure et ont déployé des techniques de détection à soustraction d'interférences. Pour notre système, aucune mesure n'a été prise et ce afin de simplifier la procédure de localisation.

Dans les paragraphes qui suivent, nous évaluons par simulations les performances du système proposé avec $M_f = 3$ échelles et pour différentes valeurs du nombre N de sources. Une validation des résultats à travers des expérimentations sera également donnée.

4.3 Evaluation des performances du système de localisation

Les performances de notre système de localisation sont données en termes de précision moyenne de localisation et de délai de localisation. La précision moyenne correspond à la moyenne de la précision de localisation calculée sur toutes les sources qu'on souhaite localiser (ou atteindre). Le délai de localisation est mesuré à partir du nombre moyen de déplacements nécessaires au récepteur pour localiser (ou atteindre) une source.

4.3.1 Evaluation par simulations

Nous évaluons la précision moyenne de localisation dans le cas de 2, 4 et 9 sources espacées respectivement d'une distance $D \in \{30cm, 40cm, 20cm\}$. Ces sources sont placées aléatoirement, comme montré sur les figures 4.1, 4.2 et 4.3, dans une salle de dimensions $4 \times 4 \times 2.2 m^3$ contenant quatre transducteurs dont les positions sont données dans le tableau 4.1. La réponse impulsionnelle de la salle, donnée par le modèle d'Allen et Berkley [9], s'exprime comme suit :

$$h(r_s, r_r, t) = \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \beta_{x_1}^{m_x - q} \beta_{x_2}^{m_x} \beta_{y_1}^{m_y - j} \beta_{y_2}^{m_y} \beta_{z_1}^{m_z - k} \beta_{z_2}^{m_z} \frac{\delta(t - \tau)}{4\pi d} \quad (4.6)$$

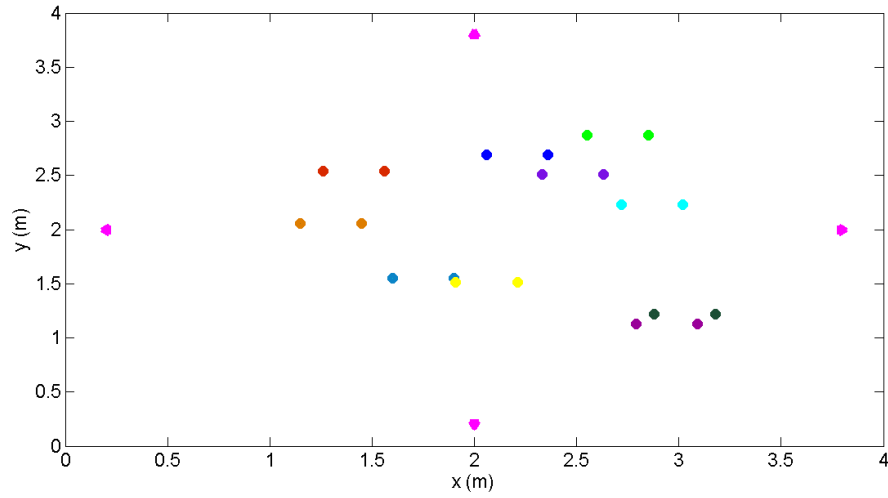
Les $(\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \beta_{y_1}, \beta_{y_2}, \beta_{z_1}, \beta_{z_2})$ désignent les coefficients de réflexion des quatre murs, du sol et du plafond. τ et d présentent respectivement le retard et la distance du trajet entre la source et le récepteur. $M = \{(m_x, m_y, m_z) : m_x, m_y, m_z : \text{entiers}\}$ et $P = \{(q, j, k) : q, j, k \in \{0, 1\}\}$.

Comme dans le cas d'une seule source, nous supposons que le récepteur est situé dans

	Transducteur 1	Transducteur 2	Transducteur 3	Transducteur 4
Positions des transducteurs	$(0.2m, 2m, 2m)$	$(2m, 0.2m, 2m)$	$(2m, 3.8m, 2m)$	$(3.8m, 2m, 2m)$

TABLE 4.1: Positions des transducteurs.

une zone carrée de dimensions $1.2 \times 1.2 m^2$ centrée à la position de la source qu'il souhaite localiser ou atteindre. Le récepteur se déplace à l'aide de l'algorithme du recuit

FIGURE 4.1: Disposition des sources à localiser dans la salle, $N = 2$.

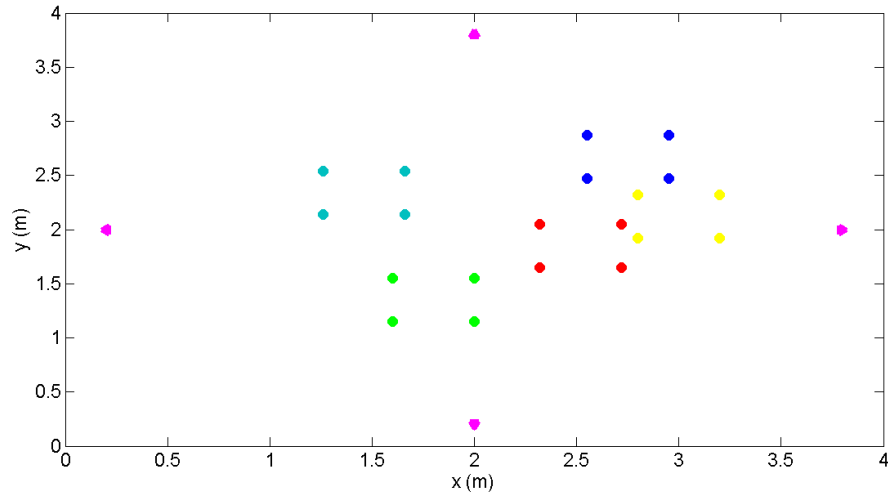
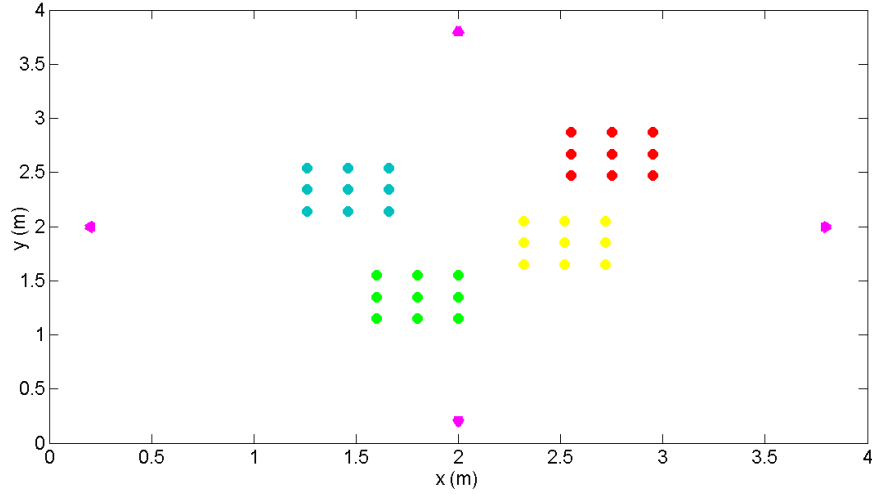
simulé dans la zone d'intérêt afin de déterminer la position de la source avec une échelle grossière. Il change de fréquence pour localiser la source avec une échelle plus fine dans une zone réduite.

La longueur des codes de Gold émis par les N sources est de 127 chips. En ce qui concerne les paramètres du système, nous avons gardé les mêmes valeurs de paramètres du recuit simulé, des pas de déplacement et des dimensions des zones réduites que celles utilisées dans le chapitre 3 dans le cas de la localisation d'une seule source à trois échelles. Ces valeurs sont données dans le tableau 4.2. Les figures 4.4, 4.5 et 4.6 donnent la précision moyenne de localisation obtenue pour $N \in \{2, 4\}$ pour différentes valeurs de fréquence. La précision moyenne de localisation pour $N = 9$ est représentée sur les figures 4.7, 4.8 et 4.9. Nous reportons également, à titre de comparaison, les courbes relatives au cas

	Température	Pas de déplacement (cm)	Largeur de la zone réduite (cm)
200 Hz	0	6	120
800 Hz	0	4	20
4 kHz	0	2	6

TABLE 4.2: Valeurs des paramètres utilisés.

de la localisation d'une seule source. Les dispositions des 20 et des 36 sources localisées individuellement sont données aux figures 4.10 et 4.11. Nous pouvons constater que les performances du système de localisation simultanée de deux sources sont dégradées par rapport à celles du système de localisation d'une seule source : une détérioration en précision de 6% est observée pour une erreur inférieure ou égale à 10 cm à l'échelle grossière et une dégradation de l'ordre de 4% est observée pour des erreurs inférieures ou égales à 3 cm et 1.5 cm obtenues respectivement avec les deux premières échelles (i.e., $f \in \{200Hz, 800Hz\}$) et les trois échelles (i.e., $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$).

FIGURE 4.2: Disposition des sources à localiser dans la salle, $N = 4$.FIGURE 4.3: Disposition des sources à localiser dans la salle, $N = 9$.

Pour $N = 4$ et comparé au système de localisation d'une seule source, nous observons une dégradation en précision de l'ordre de 9% pour une erreur inférieure ou égale à 10 cm et une dégradation de l'ordre de 6% pour une erreur inférieure ou égale à 3cm obtenues respectivement avec l'échelle grossière et les deux premières échelles (i.e., $f \in \{200Hz, 800Hz\}$). Une détérioration de 4% pour une erreur de 1.5 cm est atteinte avec les trois échelles (i.e., $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$).

Pour $N = 9$, la précision de localisation pour une erreur inférieure ou égale à 10 cm s'est dégradée de 26.87% comparé au système de localisation d'une seule source. Pour une erreur inférieure ou égale à 3 cm, la dégradation en précision obtenue avec $f \in \{200Hz, 800Hz\}$ est de 15.43%. Une détérioration en précision de 17% pour une erreur inférieure ou égale à 1.5 cm est atteinte avec $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$.

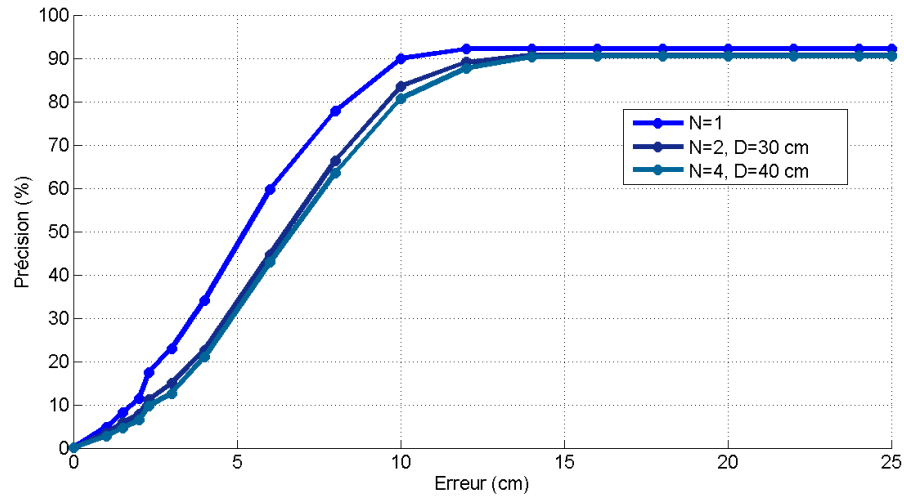


FIGURE 4.4: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 2, 4\}$ et $f = 200Hz$.

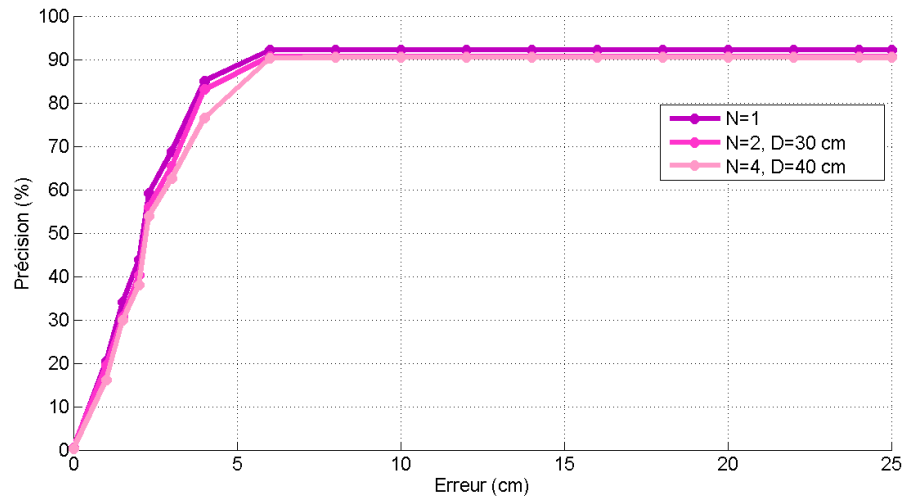


FIGURE 4.5: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 2, 4\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz\}$.

Cette dégradation est due essentiellement à l'interférence entre les sources. On constate, par ailleurs, que la dégradation en précision diminue quand on augmente le nombre d'échelles de 1 à 2. Ceci s'explique par le fait que, pour $f = 200 Hz$, les valeurs de précision pour des erreurs relativement élevées obtenues avec $N \in \{2, 4, 9\}$ s'approchent de la valeur de la précision obtenue avec $N = 1$ (voir tableau 4.3) : La précision de localisation pour une erreur inférieure ou égale à 14 cm obtenue avec $N \in \{2, 4\}$ s'est dégradée d'environ 2% comparé au cas de $N = 1$. Pour $N = 9$, la dégradation en précision pour la même valeur de l'erreur est de l'ordre de 13%. A l'échelle intermédiaire, nous réduisons la zone de recherche à une zone carrée de largeur 2×10 cm centrée à la position estimée à la basse fréquence. Cette zone contient non seulement des estimations avec une

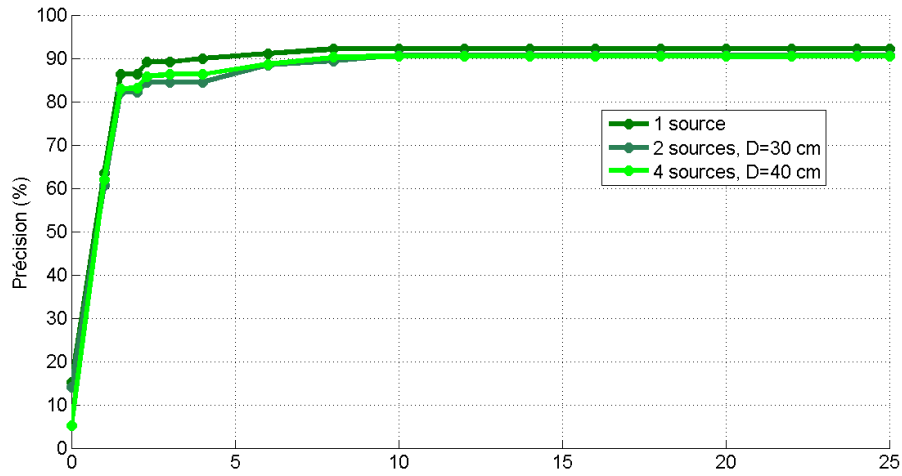


FIGURE 4.6: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 2, 4\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$.

erreur inférieure ou égale à 10 cm mais également des positions estimées avec une erreur inférieure ou égale à 14 cm ($\sqrt{2} \times 10$ cm).

N	1	2	4	9
$f = 200$ Hz	92.1%	90.6%	90.3%	78.7%

TABLE 4.3: Précision pour une erreur de localisation inférieure ou égale à 14 cm pour $N \in \{1, 2, 4, 9\}$ et $f = 200Hz$.

Malgré la dégradation observée, le système présente une précision moyenne de localisation de 84.5% pour une erreur inférieure ou égale à 2.3 cm dans le cas de $N = 2$. Pour $N = 4$ et $N = 9$, il atteint la même valeur de l'erreur avec une précision de 85% et 74% respectivement.

Nous évaluons dans les expérimentations décrites dans le paragraphe suivant les performances du système proposé.

4.3.2 Evaluation par expérimentations

Nous évaluons par expérimentations effectuées dans une salle de réunion à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans les performances de notre système dans le cas de la localisation simultanée de deux sources distantes de 30 cm.

L'objectif de cette expérimentation est de valider les résultats obtenus dans les simulations sur des signaux réels et ce, en utilisant les mêmes paramètres de simulations tels que la disposition des transducteurs du miroir à retournement temporel et les signaux émis.

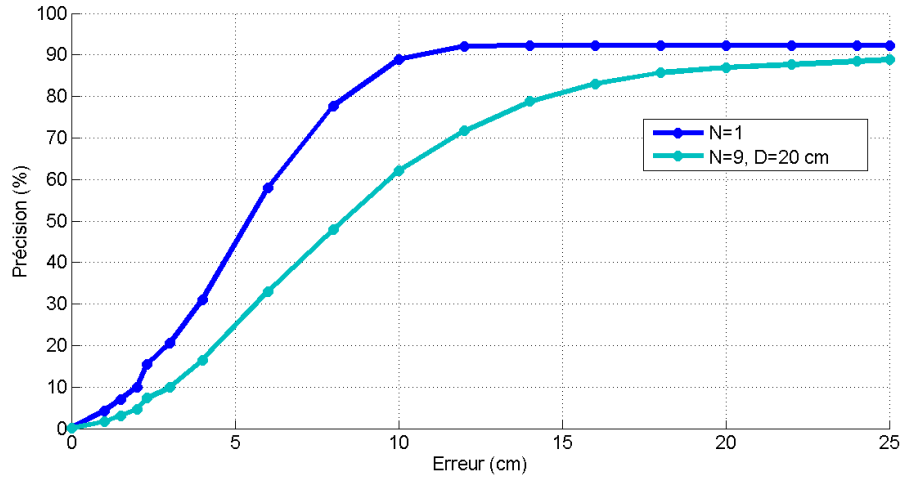


FIGURE 4.7: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 9\}$ et $f = 200\text{Hz}$.

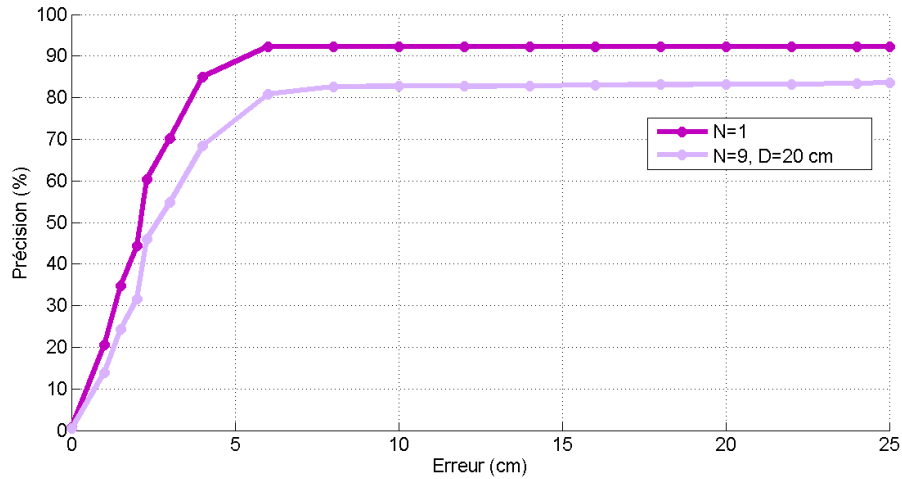


FIGURE 4.8: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 9\}$ et $f \in \{200\text{Hz}, 800\text{Hz}\}$.

Un deuxième intérêt de cette expérimentation est d'évaluer les performances de notre système dans un environnement réel plus bruité que celui des simulations.

4.3.2.1 Description du site d'expérimentation

Il s'agit d'une salle de réunion comportant des tables, des chaises et dont les murs, le plafond et le sol sont composés des différents types de matériaux (figures 4.12 et 4.13). La zone d'intérêt dans laquelle nous avons effectué les mesures est de dimensions $4 \times 4 \times 2.2\text{m}^3$. Dans cette zone, nous avons placé quatre transducteurs du miroir à retournement temporel aux mêmes positions que celles dans les simulations. Nous avons également déployé les mêmes séquences de Gold, les mêmes valeurs de fréquences que celles utilisées dans les simulations.

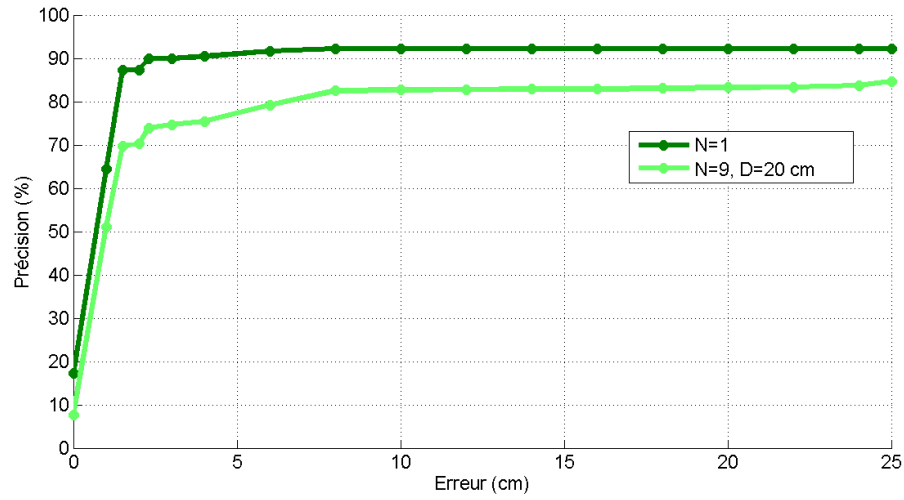


FIGURE 4.9: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation pour $N \in \{1, 9\}$ et $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$.

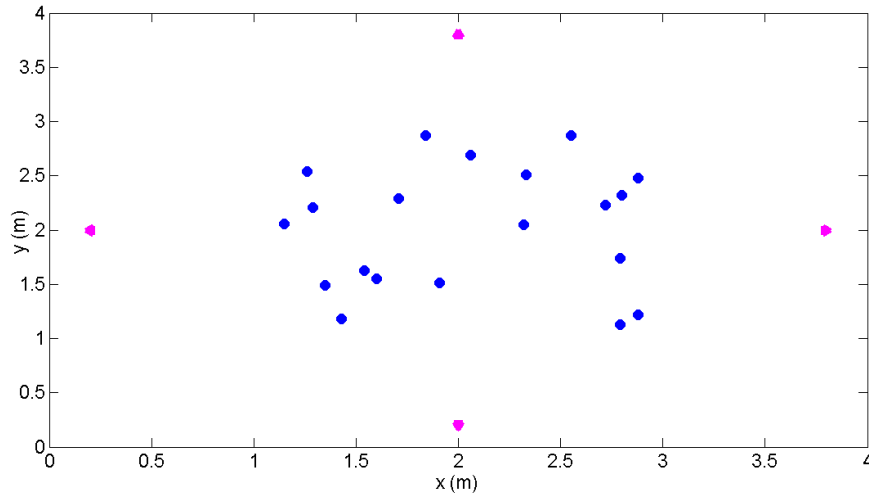


FIGURE 4.10: Disposition des 20 sources à localiser dans la salle, $N = 1$.

Dans cette expérimentation, nous visons à localiser une seule paire de sources séparées d'une distance de 30 cm : la première, notée $S1$, est située au milieu de la zone (i.e., la position $(2m, 2m, 1.52m)$) et la deuxième, notée $S2$, est placée à la position $(1.9m, 1.72m, 1.52m)$. Les résultats expérimentaux obtenus pour ces deux sources pourraient être généralisés aux cas des autres positions possibles de sources dans la zone d'intérêt.

Nous mesurons, par pas de 2 cm, le signal reçu après retournement temporel dans une zone de dimensions $70 \times 70 \text{ cm}^2$. Ceci revient alors à effectuer 1296 mesures. La zone de mesure est montrée à la figure 4.14.

Il est intéressant de noter qu'il n'était pas possible de garder les mêmes dimensions de la zone de mesure, le même nombre de paires de sources à localiser et le même pas

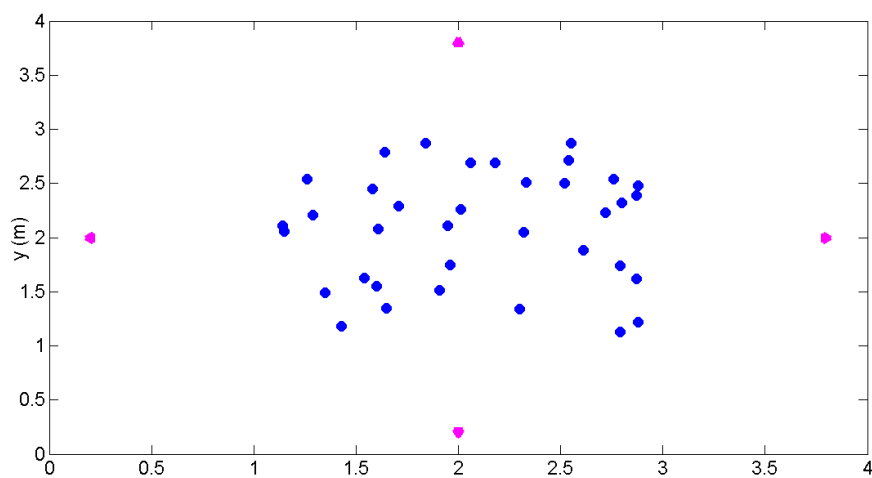
FIGURE 4.11: Disposition des 36 sources à localiser dans la salle, $N = 1$.

FIGURE 4.12: Photos du site d'expérimentation, 1 ère angle de vue.



FIGURE 4.13: Photos du site d'expérimentation, 2 ème angle de vue.

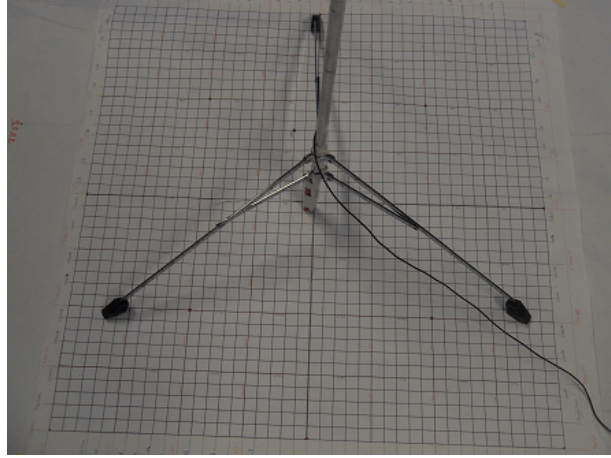


FIGURE 4.14: Zone de mesure.

de mesure du signal reçu comme dans les simulations. En effet, une zone de dimensions $1.2m \times 1.2m$ nécessite 14641 points de mesure pour chaque paire de source. Au total, il nous faut 146410 points de mesures pour les 10 paires de source. Ceci pourrait être possible si le microphone était monté sur un banc de mesure motorisé à une dimension, par exemple. Cependant, dans cette expérimentation, nous faisons varier le microphone manuellement sur la carte de mesure pour mesurer le signal reçu à chaque point de mesure.

4.3.2.2 Protocole expérimental

Dans cette expérimentation, nous avons tiré profit du théorème de la réciprocité spatiale afin de créer deux sources initiales virtuelles aux positions r_0 et r_1 , positions des sources réelles. Le protocole expérimental se présente alors comme suit : Durant la première phase de l'expérimentation, le signal sonore initial relatif à la source S_1 est émis successivement par chacun des quatre haut-parleurs du miroir, puis enregistré sur le microphone placé à la position r_0 , position réelle de la source S_1 . Le même procédé est répété pour la source S_2 : les haut-parleurs du miroir émettent successivement le signal de la source S_2 . Les signaux sont reçus par le microphone placé à la position r_1 , position réelle de la source S_2 . Durant la deuxième phase, les signaux résultant de l'émission des deux sources sont sommés au niveau de chaque transducteur puis, réémis simultanément par les quatre haut-parleurs.

4.3.2.3 Matériel

Nous avons déployé quatre haut-parleurs et un microphone pilotés par un ordinateur à travers une carte d'acquisition (voir figure 4.15). Celle-ci comporte deux modules : un module d'acquisition, NI9234 [35], à convertisseur analogique-numérique de type

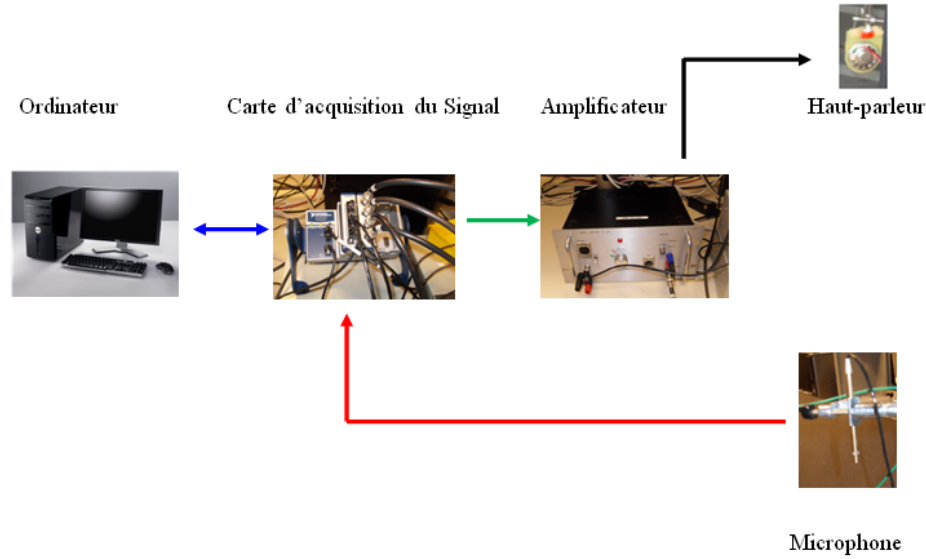


FIGURE 4.15: Schéma de raccordement du système de localisation.

Delta-Sigma à 24 bits et un module, *NI9263* [36], à convertisseur numérique-analogique de type String à 16 bits. Le microphone, étant à condensateur pré-polarisé avec préamplificateur intégré, présente une sensibilité de 10 mV/Pa. Les haut-parleurs, *SC8N* – 8 Ω , sont caractérisés par une réponse en fréquence très équilibrée dans la plage de fréquences de 70 Hz à 20 kHz. Les deux amplificateurs, *B300HPA*, utilisés présentent une sensibilité de 10 Volt rms et un gain de 22 dBu.

L'acquisition des données entre le l'ordinateur et la carte d'acquisition est effectuée via Labview et le traitement de signal est réalisé sur MATLAB.

Dans la première phase de l'expérience du retournement temporel, nous avons déployé une seule sortie de la carte d'acquisition afin d'émettre successivement le signal de la source *S1* et une seule entrée afin d'enregistrer le signal reçu par le microphone placé à la position de la source *S1*. Nous avons repris la même expérimentation pour la source *S2*. Les signaux reçus et résultant de l'émission des signaux des deux sources par chaque haut-parleur sont ensuite, sommés et retournés temporellement via Matlab. Dans la deuxième phase de l'expérience, nous avons déployé quatre sorties de la carte d'acquisition pour émettre simultanément les signaux ainsi obtenus et une seule entrée pour enregistrer le signal reçu par le microphone placé à différentes positions dans la zone de mesure.

Avant de commencer notre campagne de mesures, nous avons fait quelques tests préliminaires et nous avons compensé les différentes porteuses composant le signal d'émission. Dans les paragraphes suivants, nous présentons les résultats que nous avons obtenus pour chacune des sources *S1* et *S2*.

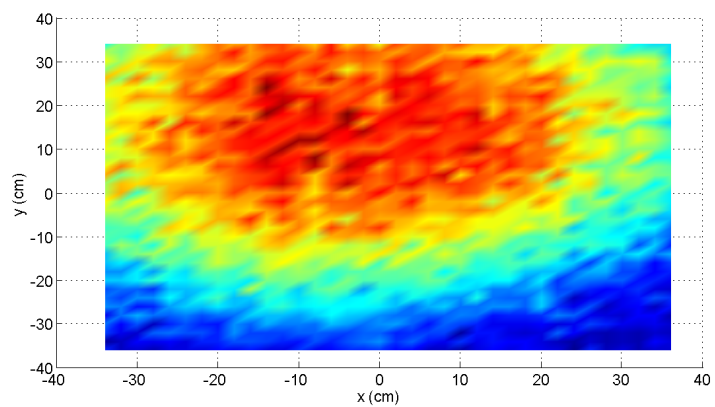
4.3.2.4 Digrammes de corrélation spatiale

Les diagrammes de corrélation spatiale obtenus par expérimentations sont montrés sur les figures 4.16, 4.17, 4.18 et 4.19. Leur allure est similaire à celle des diagrammes obtenus en simulation. En effet, pour $f = 4$ kHz, nous observons un pic aigu à la position des sources et des pics prématurés partout dans la zone. Pour $f = 800$ Hz, le pic à la source devient plus large et il y a moins de pics prématurés à ses alentours. Pour $f = 200$ Hz, le diagramme est presque plat : l'amplitude de corrélation spatiale varie lentement d'une position à une autre, toutefois, nous remarquons quelques variations brusques de l'amplitude de corrélation comparé au diagramme obtenu en simulations. Ceci s'explique par le fait que l'environnement de l'expérimentation est plus bruité que celui des simulations. Cette expérimentation a alors un double intérêt. Le premier est de valider les résultats obtenus dans les simulations et ce en adoptant des conditions d'expérimentation similaires. Le deuxième est d'évaluer les performances de notre système dans un environnement plus bruité.

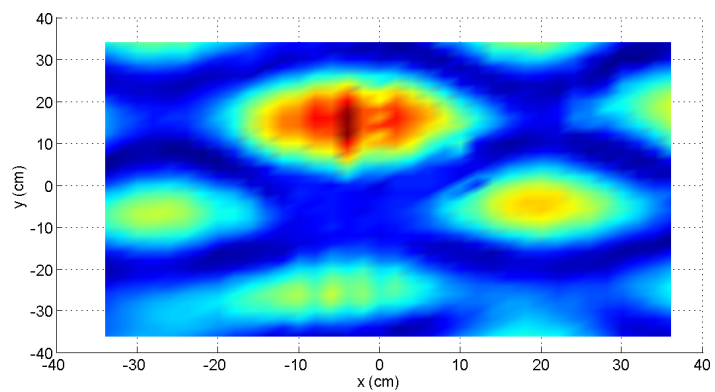
4.3.2.5 Précision de localisation des sources

Nous présentons, dans ce paragraphe, les performances de notre système obtenues par expérimentations dans le cas de la localisation simultanée des sources $S1$ et $S2$ distantes de 30 cm. Ces performances sont données en termes de précision de localisation et de délai de localisation. Nous rappelons que le récepteur, situé à une position quelconque dans la zone de mesure, se déplace moyennant la méthode de recuit simulé à la recherche de la position maximisant le diagramme de corrélation spatiale et ce pour les valeurs de fréquence notamment 200 Hz et 800 Hz. Pour 4 kHz, le récepteur se déplace régulièrement dans la zone réduite. Dans cette partie, nous ne reportons pas la phase de réglage des paramètres de recuit simulé, puisque la démarche est exactement similaire à celle adoptée dans le chapitre 3. Il s'agit de faire varier l'un des paramètres de l'algorithme ; les autres paramètres étant maintenus à des valeurs constantes. Nous rappelons que les paramètres principaux sur lesquels nous pouvons jouer sont la valeur initiale de la température et le nombre de paliers. Ces paramètres sont choisis de telle manière à obtenir un bon compromis entre précision de localisation et délai de localisation. Pour l'échelle grossière (i.e., la basse fréquence), nous optons pour une valeur de température nulle et un pas de déplacement de 8 cm. Pour l'échelle intermédiaire, la température est maintenue nulle et le récepteur se déplace avec un pas de 4 cm dans une zone de dimensions $28\text{cm} \times 28\text{cm}$ centrée à la position estimée à l'échelle précédente. A l'échelle fine, le récepteur se déplace régulièrement avec un pas de 2 cm dans une zone de dimensions $12\text{cm} \times 12\text{cm}$.

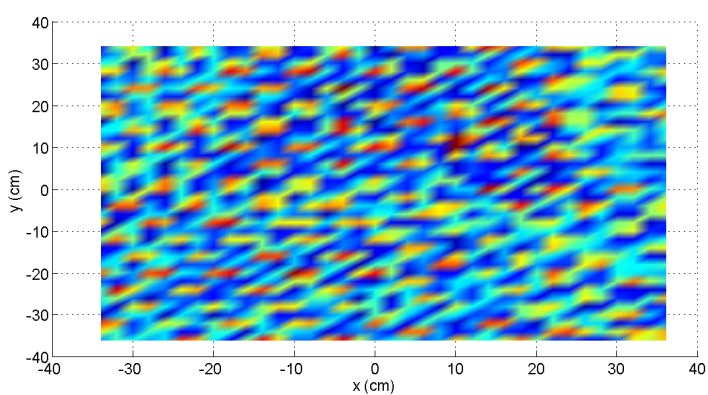
Il est à noter que les valeurs des pas de déplacement et des dimensions des zones réduites



(a)

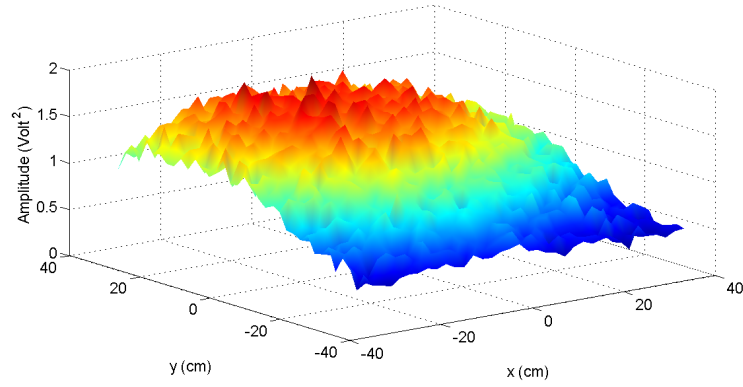


(b)

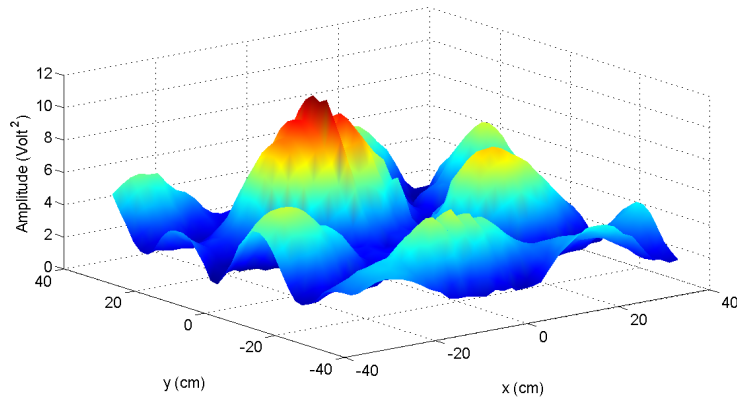


(c)

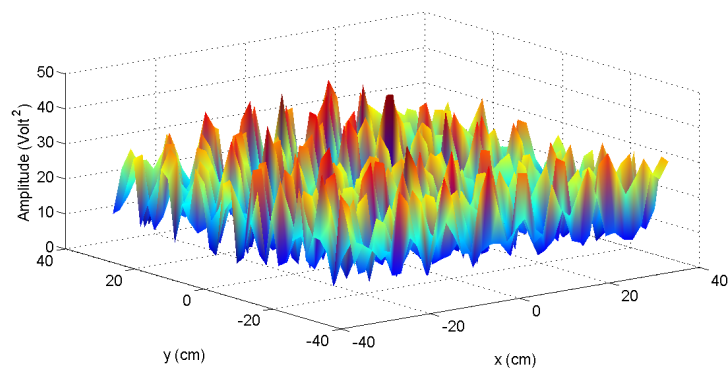
FIGURE 4.16: Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S1$: (a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.



(a)

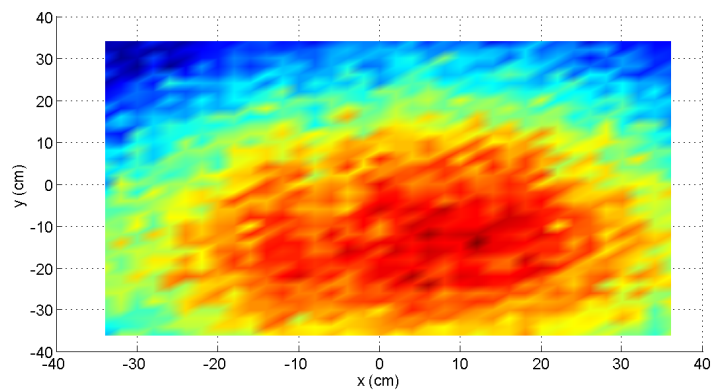


(b)

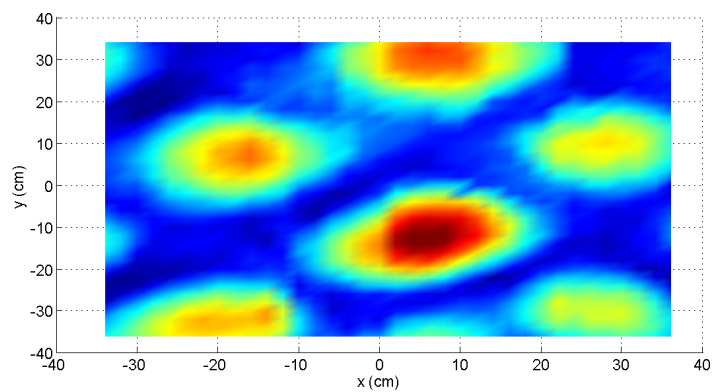


(c)

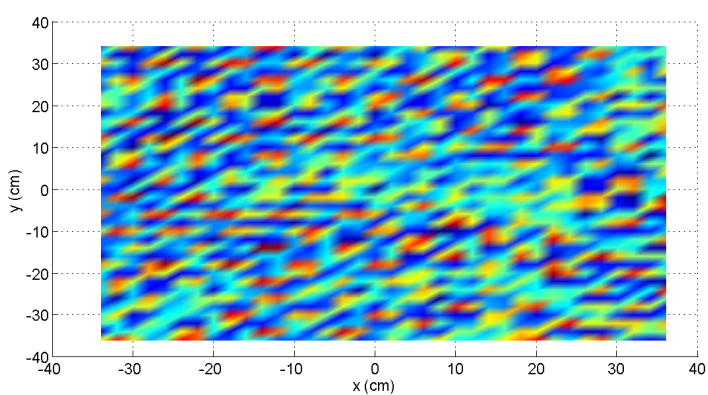
FIGURE 4.17: Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source $S1$:
(a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.



(a)

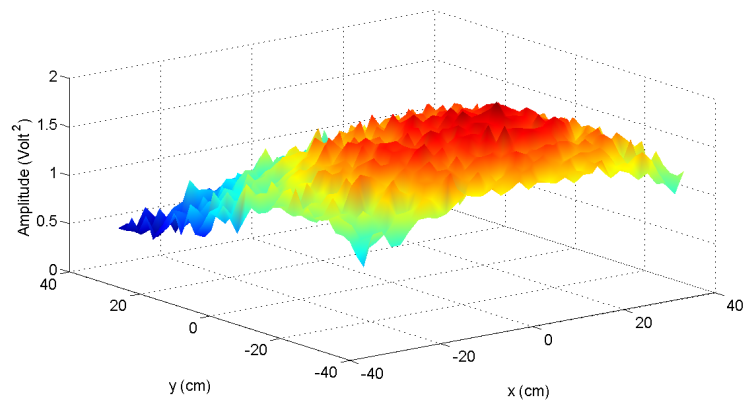


(b)

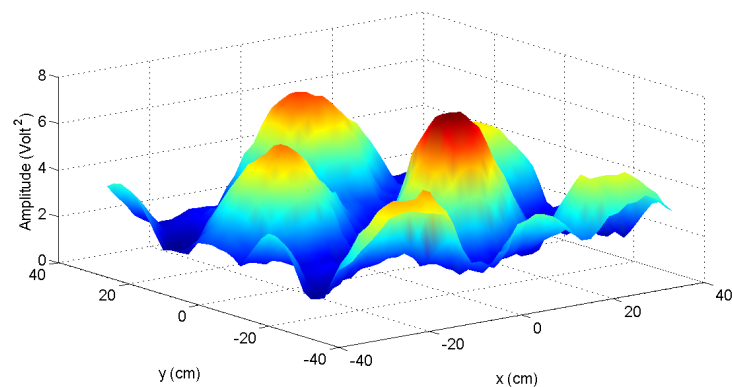


(c)

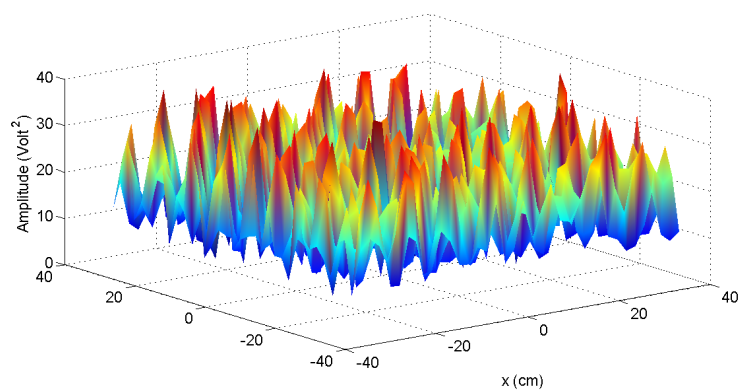
FIGURE 4.18: Diagrammes de corrélation spatiale de la source $S2$: (a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.19: Diagrammes de corrélation spatiale en 3 dimensions de la source S_2 :
(a) 200 Hz , (b) 800 Hz, (c) 4 kHz.

sont différentes de celles utilisées dans les simulations. Ceci est dû au fait que les conditions des simulations et les conditions des expérimentations ne sont pas identiques. Les tableaux 4.4 et 4.5 illustrent respectivement la précision de localisation des sources $S1$ et $S2$ obtenue avec les différentes fréquences. Dans le tableau 4.6 est reporté le nombre de déplacements effectués par le récepteur afin d'atteindre ces résultats.

Erreur (cm)	0	2	4	6	8	10
$f = 200$ Hz	0	11.40	13.40	20.40	31.80	43.20
$f \in \{200, 800\}$ Hz	14.60	45.20	60.60	67.20	74.00	77.40
$f \in \{200, 800, 4000\}$ Hz	0	74.00	74.00	74.00	74.00	74.60

TABLE 4.4: Précision en fonction de l'erreur de localisation de la source $S1$.

Erreur (cm)	0	2	4	6	8	10
$f = 200$ Hz	0	3.40	7.60	28.20	40.40	63
$f \in \{200, 800\}$ Hz	23.2	57.4	76.6	78	78.80	86.60
$f \in \{200, 800, 4000\}$ Hz	78.80	78.80	78.80	78.80	79.60	82.00

TABLE 4.5: Précision en fonction de l'erreur de localisation de la source $S2$.

Les résultats montrent une bonne précision de localisation des deux sources : une précision de 74% pour une erreur inférieure ou égale à 2 cm pour la source $S1$ et une erreur de $\simeq 0$ cm avec une précision de 79% pour la source $S2$. Ces performances sont obtenues avec un nombre moyen de déplacements de l'ordre de 96, ce qui est largement inférieur au nombre total de points de mesures et qui vaut 1296 points.

Il est à noter que le récepteur peut se contenter des échelles 200 Hz et 800 Hz s'il cherche à localiser la source avec une erreur de l'ordre de 8 cm, par exemple. Plus généralement, selon la précision de localisation souhaitée (ou encore selon l'application), le récepteur choisit le nombre d'échelles de son système de localisation.

Source	$S1$	$S2$
Nombre moyen de déplacements	95	98

TABLE 4.6: Nombre moyen de déplacements du récepteur.

Malgré les bonnes performances de notre système, il présente cependant quelques inconvénients tels que l'audibilité du signal utilisé pour la localisation. La partie suivante de ce chapitre traitera cette limitation.

4.4 Application d'un modèle psycho-acoustique

Dans tout ce qui précède, notre objectif était de proposer des solutions afin de réaliser un système de localisation à la fois multi-échelles et multi-sources. Les solutions proposées, nous les avons testées par des simulations et validées par des expérimentations. Cependant, nous ne nous sommes pas préoccupés de l'audibilité du signal utile pour la localisation. En effet, une des limitations de notre système de localisation réside dans l'emploi d'un signal sonore audible. La transmission d'un son audible dans les environnements internes pourrait déranger les personnes se trouvant à l'intérieur de ces environnements. Dans [47], les auteurs ont surmonté cette limitation en émettant un signal sonore à faible amplitude issu d'une séquence de Gold longue. L'utilisation d'une séquence de Gold de longueur importante avait pour objectif d'améliorer le rapport signal à bruit, vu que le signal est émis à faible amplitude. Les auteurs ont également proposé de mélanger le signal utile pour la localisation avec la musique. Les premiers résultats ont montré que ceci n'affecte que légèrement les performances de leur système de localisation.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons eu recours à la psycho-acoustique afin de réduire l'audibilité de notre signal. Cette discipline, faisant appel à l'acoustique et la physiologie auditive, s'intéresse essentiellement à relier les caractéristiques d'un son à la sensation auditive qu'il génère.

4.4.1 Anatomie de l'oreille

L'oreille comporte trois parties appelées oreille externe, oreille moyenne et oreille interne (figure 4.20). L'oreille externe capte l'onde sonore qui est caractérisée par un niveau d'intensité exprimé en décibels Sound Pressure Level (dB SPL). L'onde, étant amplifiée sélectivement en fréquence, stimule le tympan. Les osselets de l'oreille moyenne se mettent alors en vibration et l'impédance entre les deux différents milieux de l'oreille externe et de l'oreille interne est alors adaptée. La membrane basilaire à laquelle est reliée le limaçon (ou la cochlée), organe d'audition de l'oreille interne, résonne en réponse à l'onde sonore. Cette résonance excite les cellules ciliées de l'organe de Corti, situé sur la membrane basilaire. Le signal sonore est alors traduit en message nerveux. Le maximum de résonance est atteint en un point spécifique de la membrane basilaire qui dépend de la tonalité de l'onde acoustique. Une analogie entre les points de la membrane et l'échelle des fréquences audibles peut être établie [48]. L'oreille peut alors être vue comme un analyseur fréquentiel du signal sonore.

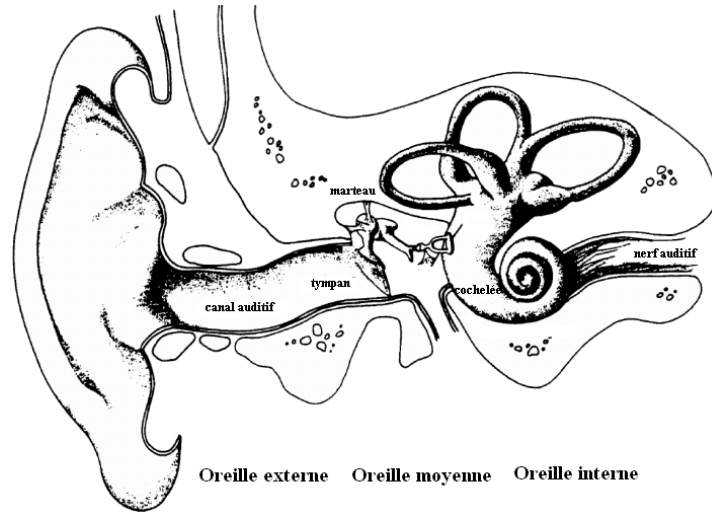


FIGURE 4.20: Structure de l'oreille [49].

4.4.2 Seuil d'audition absolu

Pour qu'il soit détecté (i.e., pour qu'il y ait une résonance significative de la membrane basilaire), le niveau de l'intensité d'un son doit dépasser un seuil dépendant de la fréquence. Ce seuil a été quantifié grâce aux expériences de Fletcher menées dans un environnement sonore non bruité et déployant un son sinusoïdal de fréquence variable. Ce seuil, appelé seuil d'audition absolu, est donné par la fonction non linéaire suivante :

$$S_a(f) = 3.64 \times f^{-0.8} - 6.5 \times \exp(-0.6 \times (f - 3.3)^2) + 10^{-3} \times f^4 (dB SPL) \quad (4.7)$$

avec f la fréquence exprimée en kHz.

La figure 4.21 représente le seuil d'audition absolu pour une bande de fréquence de 100 Hz à 5 kHz. Nous remarquons que le niveau de l'intensité sonore est plus important dans des zones de fréquences que dans d'autres. Afin d'atteindre le seuil d'audition absolu, il faut une pression acoustique plus importante dans les zones où le niveau d'intensité est plus élevé que dans les zones où le niveau d'intensité est plus faible. C'est sur cette remarque que repose notre solution face à l'audibilité du signal de localisation.

4.4.3 Réduction de l'audibilité du signal de localisation

Nous proposons d'appliquer à notre signal de localisation un filtre permettant de réduire son audibilité. Ce filtre, nous le définissons à partir du seuil d'audition absolu. Comme il a été précédemment mentionné, ce seuil présente la limite à partir de laquelle le son devient audible : il présente des zones de fréquences dans lesquelles nos oreilles sont plus sensibles au son que dans d'autres. L'idée est alors d'envoyer un signal de localisation à faible amplitude dans les zones où la sensibilité de l'oreille est meilleure et

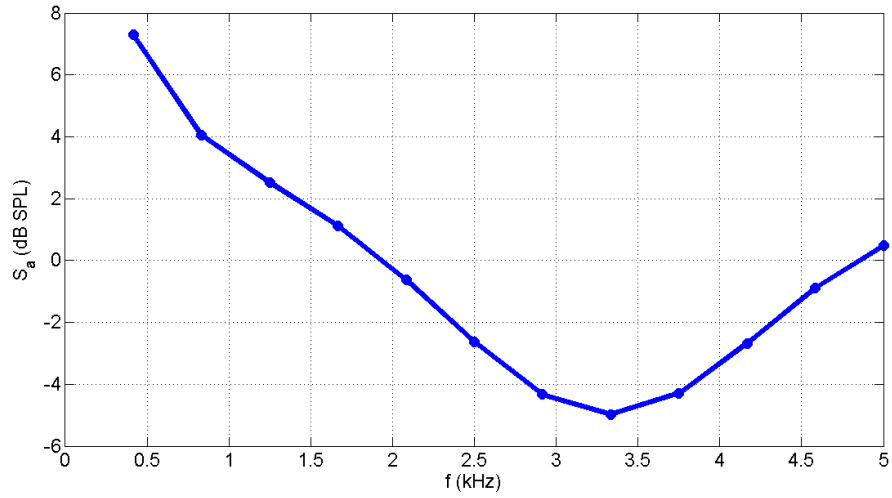
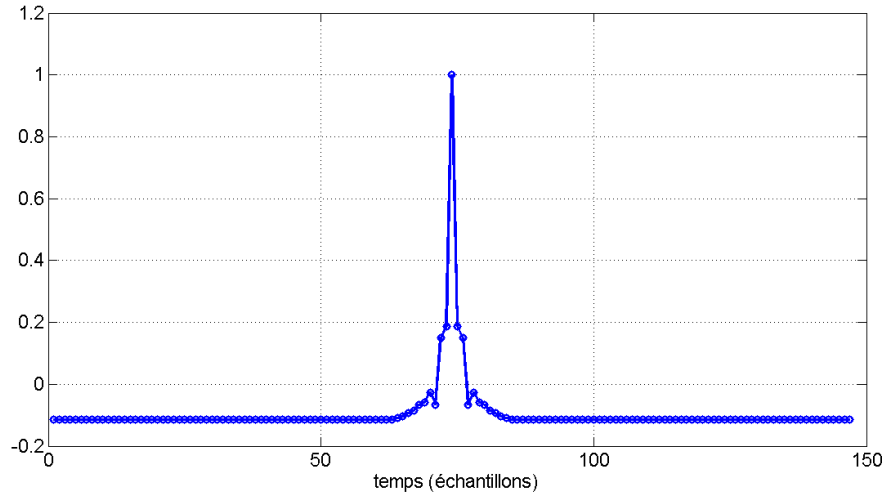


FIGURE 4.21: Seuil d'audition absolu.

FIGURE 4.22: Réponse impulsionnelle normalisée du filtre, $h(t)$.

d'émettre un signal de localisation à amplitude plus forte dans les zones de fréquences où nous entendons mal. Pour obtenir la fonction de transfert de ce filtre, nous transformons d'abord le seuil d'audition absolu, donné par l'équation 4.7, à l'échelle linéaire en se basant sur la formule :

$$S_a(f) = 10 \times \log_{10}\left(\left(\frac{P_a}{P_{a_0}}\right)^2\right) \quad (4.8)$$

où $S_a(f)$ le niveau d'intensité acoustique, P_a la pression acoustique et $P_{a_0} = 2 \times 10^{-5}$ Pa la pression acoustique de référence.

En appliquant une transformée de Fourier inverse sur la pression ainsi calculée, nous obtenons alors la réponse impulsionnelle du filtre, qu'on note par $h(t)$ (voir figure 4.22).

Pendant la première étape de l'opération du retournement temporel, les transducteurs du miroir à retournement temporel enregistrent les signaux émis par les sources et

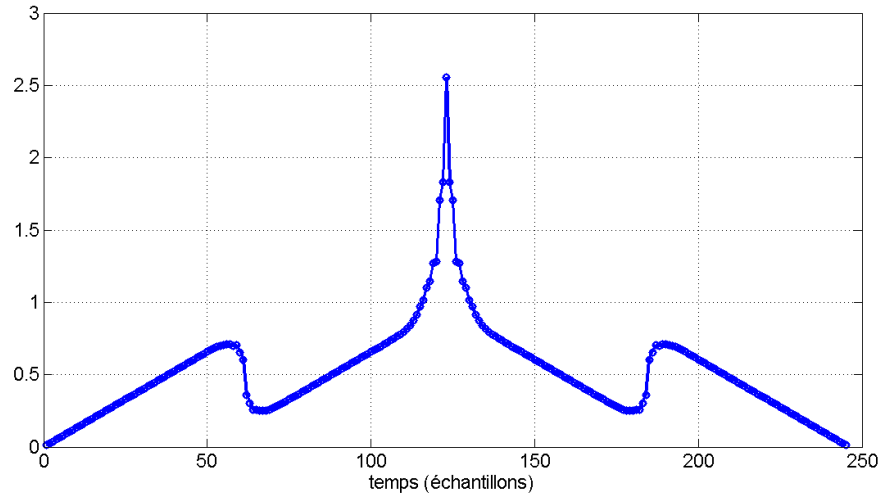


FIGURE 4.23: Produit de convolution linéaire des réponses impulsionnelles des filtres $h(t)$ et $g(t)$.

les retournent temporellement. Les sources représentent les destinations que l'utilisateur de notre système souhaite atteindre ou localiser. Pendant la deuxième étape de l'opération du retournement temporel, l'utilisateur du système se déplace dans la zone d'intérêt à la recherche de la source ou de sa destination. La première étape ne fait pas alors intervenir les utilisateurs du système. Elle est plutôt contrôlée par les administrateurs du système de localisation. Le problème de l'audibilité du signal de localisation se pose uniquement dans la deuxième étape de l'opération. C'est alors dans cette étape que nous appliquons notre modèle psycho-acoustique aux retournés temporels des signaux reçus aux niveaux des transducteurs. Au niveau du dispositif de positionnement de l'utilisateur, un filtre adapté à $h(t)$, de réponse impulsionnelle notée par $g(t)$ est appliqué :

$$g(t) = h(-t) \quad (4.9)$$

Ce filtre permet de maximiser le rapport signal sur bruit à sa sortie. Le produit de convolution linéaire des deux filtres est reporté à la figure 4.23.

4.4.3.1 Résultats de simulations

Nous avons évalué par simulations les performances de notre système de localisation avec modèle psycho-acoustique en considérant le cas de la localisation d'une seule source. Nous avons comparé ses performances vis-à-vis de celles obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique, et ce pour différentes valeurs du rapport signal à bruit calculées au niveau du récepteur, placé à la position de la source. Nous avons cherché à localiser les 20 sources représentées à la figure 4.10 en gardant les mêmes valeurs des paramètres de la méthode du recuit simulé, des pas de déplacement et des dimensions

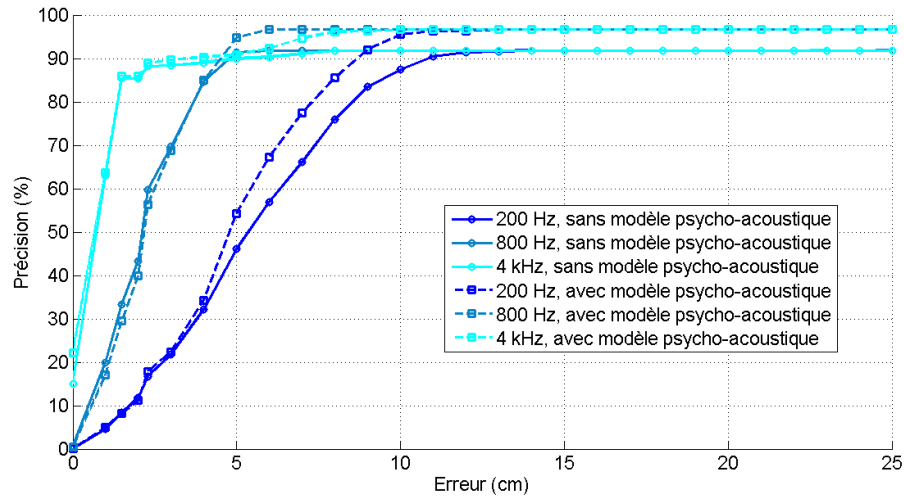


FIGURE 4.24: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique et avec le système avec modèle psycho-acoustique, $f \in \{200\text{Hz}, 800\text{Hz}, 4\text{kHz}\}$ et $RSB = 10$ dB.

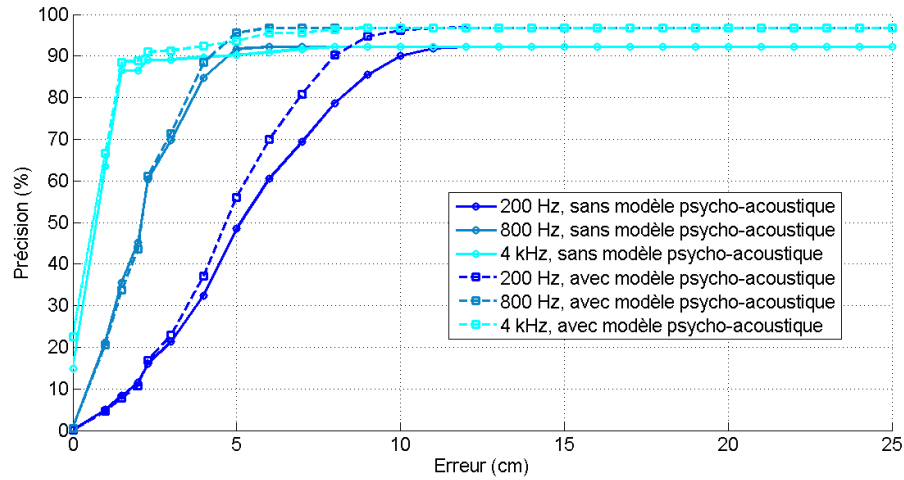


FIGURE 4.25: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique et avec le système avec modèle psycho-acoustique, $f \in \{200\text{Hz}, 800\text{Hz}, 4\text{kHz}\}$ et $RSB = 20$ dB.

des zones de recherche réduites que celles utilisées dans la section 4.3.1 et présentées dans le tableau 4.2. La précision moyenne de localisation obtenue avec le système basé sur le modèle psycho-acoustique pour différentes valeurs de fréquence est représentée sur les figures 4.24, 4.25 et 4.26, et ce pour des valeurs de rapport signal à bruit de 10 dB, 20 dB et 30 dB respectivement. Nous avons reporté également, à titre de comparaison, la courbe relative au système sans modèle psycho-acoustique. Nous pouvons observer que les deux systèmes présentent des performances proches pour des petites valeurs de l'erreur : Pour un rapport signal à bruit de 10 dB, une erreur inférieure ou égale à 3 cm est atteinte avec les deux systèmes pour environ 69% des réalisations en utilisant les deux

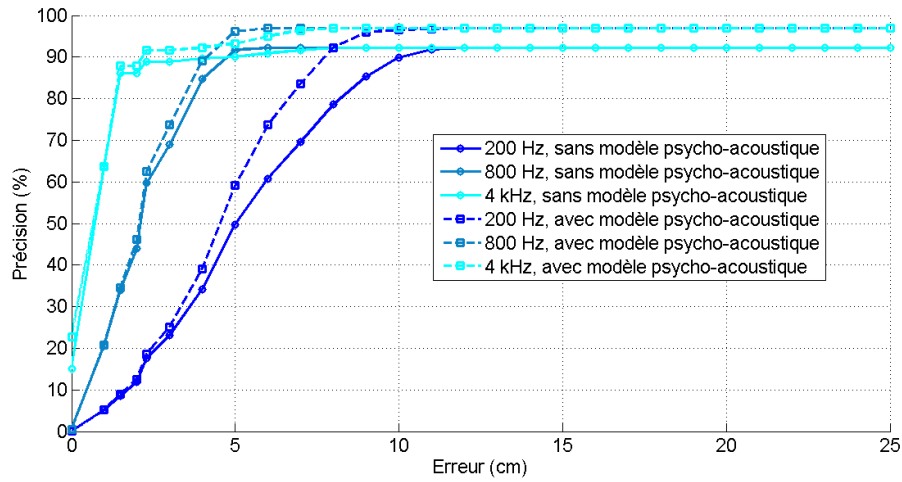


FIGURE 4.26: Comparaison des fonctions de distribution cumulative de l'erreur de localisation obtenues avec le système sans modèle psycho-acoustique et avec le système avec modèle psycho-acoustique, $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$ et $RSB = 30$ dB.

fréquences 200 Hz et 800 Hz. A l'échelle fine, les deux systèmes présentent une erreur inférieure ou égale à 1.5 cm avec une précision de 85%. Par ailleurs, nous observons un gain en précision pour une erreur inférieure ou égale à 3 cm de l'ordre de 1.5% et 4% respectivement pour des rapports signal à bruit de 20 dB et 30 dB en comparant les performances du système de localisation avec modèle psycho-acoustique à celles du système sans modèle psycho-acoustique pour $f \in \{200Hz, 800Hz\}$: Le système avec modèle psycho-acoustique localise la source avec une erreur inférieure ou égale à 3 cm pour 71.3% et 73.6% des réalisations respectivement pour 20 dB et 30 dB, alors que, sans modèle psycho-acoustique le système atteint la même valeur de l'erreur pour 69.7% des réalisations. Pour $f \in \{200Hz, 800Hz, 4kHz\}$, un gain de l'ordre de 2% a été observé pour une erreur inférieure ou égale à 1.5 cm pour des rapports signal à bruit de 20 dB et 30 dB. Cette erreur est atteinte avec le système avec modèle psycho-acoustique pour 88% des réalisations et avec une précision de 86% avec le système sans modèle psycho-acoustique. Par ailleurs, pour des valeurs supérieures de l'erreur, l'amélioration de la précision de localisation obtenue suite à l'application du modèle psycho-acoustique et du filtre adapté se stabilise à une valeur de l'ordre de 5%. Ce gain est obtenu à l'échelle grossière pour des valeurs de l'erreur supérieures ou égales à environ 11 cm et se propage aux échelles intermédiaire et fine pour des valeurs de l'erreur supérieures ou égales à environ 6 cm. L'amélioration de la précision apportée par le système avec modèle psycho-acoustique est due principalement à la maximisation du rapport signal à bruit qui s'explique à son tour par l'utilisation d'un filtre adapté à la réception.

En ce qui concerne l'audibilité du signal, nous avons fait écouter à quatre doctorants du laboratoire les signaux émis par les transducteurs dans deux versions : avec modèle psycho-acoustique et sans modèle psycho-acoustique. Ce test a montré une réduction

significative de l'audibilité du signal de localisation suite à l'adoption du modèle psycho-acoustique.

En conclusion, l'application d'un modèle psycho-acoustique à notre signal de localisation a permis de réduire son audibilité tout en améliorant la précision de localisation.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système de localisation multi-sources et multi-échelles [5] [6]. Ce système permet de localiser simultanément plusieurs sources avec différentes précisions de localisation et ce grâce à la méthode d'accès multiples à répartition de code et à la dépendance du diagramme de corrélation spatiale vis-à-vis de la fréquence porteuse utilisée. Ses performances évaluées par simulations en termes de précision moyenne de localisation et de délai de localisation pour différentes valeurs du nombre de sources ont été comparées aux performances obtenues dans le cas de localisation d'une seule source. Les résultats ont montré qu'une dégradation en précision de l'ordre de 4% pour une erreur inférieure ou égale à 1.5 cm est observée pour $N = 2$ et $N = 4$ comparé au cas de $N = 1$. Pour $N = 9$, la détérioration est de l'ordre de 17%. Cependant, malgré la dégradation observée, le système de localisation de neuf sources présente une précision de localisation moyenne de l'ordre de 74% pour une erreur inférieure ou égale à 2.3 cm. Par ailleurs, une évaluation des performances du système dans un environnement réel plus bruité que celui des simulations a été effectuée à travers des expérimentations et a montré que le système localise simultanément deux sources avec une précision de l'ordre de 77% pour une erreur inférieure ou égale à 2 cm.

Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous avons cherché à réduire l'audibilité du signal de localisation. Nous avons alors défini un filtre à partir du seuil d'audition absolu que nous avons appliqué à notre signal. Une comparaison des performances de notre système de localisation multi-échelles avec modèle psycho-acoustique et celles du système sans modèle psycho-acoustique a été établie et a montré une amélioration de la précision de localisation grâce à l'utilisation d'un filtre adapté au modèle psycho-acoustique à la réception. Par ailleurs, l'écoute des signaux émis par les transducteurs du miroir à retournement temporel dans deux versions : avec modèle psycho-acoustique et sans modèle psycho-acoustique a montré une réduction significative de l'audibilité du signal de localisation suite à l'application du modèle psycho-acoustique.

Conclusion générale

Conclusions

L'objectif général de cette thèse était de proposer une solution de localisation à la fois simple et robuste à l'effet des trajets multiples caractérisant les environnements intérieurs.

La première partie de notre étude a été consacrée au développement d'un système de localisation acoustique basé sur le temps d'arrivée et sur la méthode des signatures. Ce système a été ensuite évalué expérimentalement dans deux architectures différentes : une architecture orientée privée en utilisant la méthode d'accès multiple à répartition par code et une architecture de localisation à architecture centralisée en déployant la méthode d'accès multiple à répartition dans le temps. Nous avons étudié l'effet de la variation des différents paramètres du système à savoir le nombre des haut-parleurs, leurs positions et le nombre de positions de références sur ses performances. Nos résultats ont montré que l'ajout d'un nouveau haut-parleur ainsi que le changement de l'emplacement des sources se traduisent par une dégradation des performances du système de localisation du microphone. A l'issue de cette étude, nous avons proposé un critère de choix des mesures les plus fiables pour l'estimation de la position. Ceci a permis une amélioration de l'ordre de 24% des performances du système en termes de précision. Par ailleurs, nous avons observé que le choix des meilleures positions de références a amélioré la précision de localisation d'environ 3% et 7%, respectivement, pour le système de localisation à architecture centralisée et pour le système de localisation à architecture orientée privée. Enfin, une comparaison expérimentale dans le même banc d'essai des performances de notre système de localisation à architecture orientée privée et d'un système de localisation sonore à étalement de spectre déjà existant et basé sur la méthode de trilatération nous a permis d'observer que les performances de notre système sont meilleures que celles du système de localisation déjà existant. Bien que ces résultats confirment les résultats trouvés dans le cas de la localisation par ondes radiofréquences, nos expérimentations sont les premières à montrer l'effet de la réverbération sur les approches de localisation acoustique.

La deuxième partie de notre étude a porté sur la localisation par la méthode de retournement temporel. Le système de localisation développé tire profit de la dépendance du diagramme de corrélation spatiale par rapport à la fréquence porteuse utilisée et ce afin de permettre à ses utilisateurs de localiser l'objet d'intérêt avec différentes précisions de localisation. Ce système peut être appliqué pour trouver une source qui souhaite se localiser ou pour permettre à un récepteur sonore d'atteindre sa destination souhaitée, celle-ci étant équipée par une source sonore. En premier lieu, nous avons effectué une localisation à deux échelles : une échelle grossière et une échelle fine. Les résultats expérimentaux ont confirmé les résultats de simulations et ont montré que le système permet une erreur inférieure ou égale à 1 cm avec une précision de 87%. En deuxième lieu, nous nous sommes intéressés à réduire le délai de localisation, mesuré à partir du nombre moyen de déplacements du récepteur nécessaire pour atteindre ou localiser la source. Nous avons constaté que l'ajout d'une échelle intermédiaire permet d'obtenir un bon compromis entre précision et délai de localisation.

Nous avons ensuite étendu notre système de localisation multi-échelles au cas de plusieurs sources grâce à l'utilisation de la méthode d'accès multiple à répartition par code. Une évaluation des performances de ce système en termes de précision et délai de localisation a été menée par des simulations pour différentes valeurs du nombre de sources, N . Les résultats ont montré que le système permet de localiser simultanément deux sources avec une précision de 84.5% pour une erreur inférieure ou égale à 2.3 cm. Pour $N = 4$ et $N = 9$, le système présente respectivement une précision de 85% et 74% pour la même valeur de l'erreur. Une comparaison avec le système de localisation d'une seule source a montré une dégradation en précision de 4% pour une erreur inférieure ou égale à 1.5cm pour $N = 2$ et $N = 4$ et une dégradation de 17% pour $N = 9$. Des expérimentations ont également été menées afin de valider les résultats de simulations trouvés dans le cas de deux sources.

Dans tout ce qui précède, nous avons uniquement cherché à valider les concepts multi-échelles et multi-sources de notre système de localisation, sans nous préoccuper de l'audibilité du signal utile à la localisation. Cependant, la transmission d'un son audible dans les environnements internes pourrait déranger les personnes se trouvant à l'intérieur de ces environnements. Ainsi nous avons cherché à réduire l'audibilité du signal de localisation par recours à la psycho-acoustique. Nous avons alors défini un filtre, à partir du seuil d'audition absolu, que nous avons appliqué à notre signal de localisation. Nous avons établi une comparaison des performances de ce système avec notre système de localisation multi-échelles sans modèle psycho-acoustique. Cette comparaison a montré une amélioration de la précision de localisation grâce à l'utilisation d'un filtre adapté au modèle psycho-acoustique à la réception. Par ailleurs, l'écoute des signaux émis dans deux versions : avec modèle psycho-acoustique et sans modèle psycho-acoustique a montré une réduction significative de l'audibilité du signal de localisation suite à l'application

du modèle psycho-acoustique.

Perspectives

Parmi les perspectives envisageables pour compléter cette étude, nous pouvons citer :

- Validation de notre premier système de localisation dans un banc d'essai plus large. Il est à noter que les dimensions de notre banc d'essai ont été limitées par le matériel disponible à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans. Une façon de déployer notre système dans un environnement réel consiste à fixer les haut-parleurs du système de localisation à architecture orientée privée et les microphones du système de localisation à architecture centralisée au plafond. Les cotes des positions de références doivent avoir des valeurs proches à celui de l'objet d'intérêt.
- Extension de ce système au cas de la localisation en trois dimensions. Pour cela, on doit placer les positions de références non seulement à différentes valeurs de x et y mais aussi à différentes valeurs de z , ce qui conduit à une augmentation de la taille de la base de données. On peut considérer, dans ce cas, un maillage non régulier de la zone d'intérêt (i.e., les positions de référence ne sont pas régulièrement espacées).
- Pour le système de localisation basé sur la technique de retournement temporel, validation des résultats de simulations obtenus avec le modèle psycho-acoustique à travers des expérimentations.
- Extension de ce système au cas de la localisation en trois dimensions.

Bibliographie

- [1] N. Aloui , K. Raoof, A. Bouallegue, S. Letourneur, and S. Zaibi, A Novel Indoor Localization Scheme Based On Fingerprinting Technique and CDMA Signals, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sydney-Australia, 13-15th November 2012.
- [2] N. Aloui , K. Raoof A. Bouallegue, S. Letourneur and S. Zaibi, Performance Evaluation of An Acoustic Indoor Localization System Based On Fingerprinting Technique, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol.2014, pp. 1-16, January 2014.
- [3] Cem Sertatila, Mustafa A. Altinkayaa, Kosai Raoof, A Novel Acoustic Indoor Localization System Employing CDMA, *Digital Signal Processing*, vol.22, pp. 506-517, 2012.
- [4] N. Aloui , K. Raoof A. Bouallegue S. Letourneur and S. Zaibi, Multi-Resolution Localization System Based on Time Reversal And Simulated Annealing Algorithm, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Montbéliard,-France, 28-31 October 2013.
- [5] N. Aloui , K. Raoof, A. Bouallegue, S. Letourneur and S. Zaibi, Multi-user And Multi-resolution Localization Algorithm, *Acoustics 2013 New Delhi*, New Delhi-India, 10-15 November 2013.
- [6] N. Aloui , K. Raoof and A. Bouallegue, Localisation simultanée de sources par retournement temporel, *Le 12ème Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers-France, 22-25 Avril 2014.
- [7] M. Depsey, Indoor Positioning Systems in Healthcare, *Radianse Inc., White Paper*, 2003.

- [8] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part c : applications and reviews*, vol.37, pp.1067-1080, 2007.
- [9] J.B. Allen and D.A Berkley, Image method for efficiently simulating small-room acoustics, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.65, pp.943-950, April 1979.
- [10] S. R. Saunders, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, *John Wiley & Sons*, 1999.
- [11] Zahid Farid, Rosdiadee Nordin and Mahamod Ismail, Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System, *Journal of Computer Networks and Communications*, vol.2013, pp. 1-12, August 2013.
- [12] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. Springer Series in Statistics, vol.11, pp.13-31, 2009.
- [13] P. Bahl and V. Padmanabhan, RADAR : An in-building RF based user location and tracking system, *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, vol.2, pp. 775-784, March 2000.
- [14] B.Dawes and K.Chin, A comparison of deterministic and probabilistic methods for indoor localization, *The Journal of Systems and Software*, vol.84, pp. 442-451, 2011.
- [15] M. Brunato and K. Csaba, Transparent location fingerprinting for wireless services, *Proc. Med-Hoc-Net*, 2002.
- [16] R. Casas, D. Cuartielles, A. Marco H. J. Gracia and J. L. Falc, Hidden Issues in Deploying an Indoor Location System, *IEEE Pervasive Computing*, vol. 6, pp. 62-69, 2007.
- [17] X. Fernando, S. Krishnan, H. Sun and K. Kazemi-Moud, Adaptive denoising at Infrared wireless receivers, *Proc. SPIE*, 2003.
- [18] C. Lee, Y. Chang, G. Park J. Ryu S. Jeong and S. Park, Indoor Positioning System Based on Incident Angles of Infrared Emitters, *Industrial Electronics Society*, 2004.

- [19] R. Want, A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons, The Active Badge Location System, *ACM Trans. Information Systems*, vol. 10, pp. 91-102, 1992.
- [20] M. Hazas and A. Hopper, Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, pp. 536-547, 2006.
- [21] J. C. Prieto, A. R. Jiménez J. Guevara J. L. Ealo F. Seco J. O.Roa and Francisco Ramos, Performance evaluation of 3D-LOCUS advanced acoustic LPS, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol.58, pp. 2385-2395, 2009.
- [22] S.Y.Seidel and T.S.Rapport, 914 MHZ path loss prediction Model for Indoor Wireless Communications in Multi-floored buildings, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, feb. 1992.
- [23] J.D. Foley, A. Van Dam, S. K. Feiner and J. F. Hughes, Computer Graphics :Principles and Practice (2nd Edition), *Addison-Wesley*, 1990.
- [24] S. Dayekh, S. Affes, N. Kandil and C. Nerguizian, Cooperative localization in mines using fingerprinting and neural networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, April 2010.
- [25] C. Nerguizian, C. Despins and S. Affes, Geolocation in Mines with an Impulse Response Fingerprinting Technique and Neural Networks *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.5, March 2006.
- [26] M.V. Moreno-Cano, M.A.Zamora- Izquierdo ,José Santa, Antonio F.Skarmeta, An indoor localization system based on artificial neural networks and particle filters applied to intelligent buildings, *Neurocomputing-Journal-Elsevier*, vol. 122, pp. 116–125, 2013.
- [27] C. V. Lopes, A. Haghighat A. Mandal T. Givargis and P. Baldi, Localization of Off-the-Shelf Mobile Devices Using Audible Sound : Architectures, Protocols and Performance Assessment, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, vol.10, April 2006.
- [28] A. Mandal, C. V. Lopes T. Givargis A. Haghighat, R. Jurdak and P. Baldi, Beep : 3D Indoor Positioning Using Audible Sound, *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, January 2005.

- [29] Stephen P. Tarzia, Peter A. Dinda, Robert P. Dick, Gokhan Memik, Indoor Localization without Infrastructure using the Acoustic Background Spectrum, *MobiSys '11 Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems applications and services*, Bethesda, Maryland, USA, 2011.
- [30] D. V. Sarwate and M. B. Pursley, Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences, *In Proceedings of the IEEE*, Mai 1980.
- [31] P. Myllymaki, T. Roos H. Tirri P. Misikangas and J. Sievanen, A probabilistic approach to WLAN user location estimation, *International J. Wireless Inf. Networks*, vol.9, pp. 155-164, July 2002.
- [32] A. Kushki, K. N. Plataniotis and A. N. Venetsanopoulos, Kernelbased positioning in wireless local area networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol.6, pp. 689-705, June 2007.
- [33] W. Hardle, M. Muller, S. Sperlich and A. Werwatz, Nonparametric and Semiparametric Models, *Springer Series in Statistics*, 2004.
- [34] M. G. Schimek, Smoothing and Regression Approaches, Computation, and Application, *John Wiley & Sons*, 2000.
- [35] NATIONAL INSTRUMENTS, NI 9234 Operating Instructions and Specifications, *fiche technique*, 2008.
- [36] NATIONAL INSTRUMENTS, NI 9263 Operating Instructions and Specifications, *fiche technique*, 2008.
- [37] M.Fink, C.Prada, F. Wu and D.Cassereau, Self focusing in inhomogenous media with time reversal acoustics mirrors, *In Proc IEEE Ultras*, 1989.
- [38] E. BAVU, Le puits à retournement temporel dans le domaine audible : un outil de focalisation et d'imagerie à haute résolution de sources sonores et vibratoires, *Ecole Doctorale : Sciences Mecaniques, Acoustique et Electronique de Paris*, 2008.
- [39] D. Vigoureux and J.L. Guyader, A simplified Time Reversal method used to localize vibrations sources in a complex structure, *Applied Acoustics*, vol.73, pp. 491-496, 2012.

-
- [40] M.Fink, G.Montaldo and M. Tanter, Time Reversal Acoustics, *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004.
 - [41] D. Cassereau and M. Fink, Time-reversal of ultrasonic fields. iii. Theory of the closed time-reversal cavity, *IEEE Trans. Ultra. Ferr. Freq. Cont*, vol.39, pp. 579-592, 1992.
 - [42] G. Lerosey, Retournement temporel d'ondes électromagnétiques et application à la télécommunication en milieux complexes, *Université Paris 7 – Denis Diderot*, 2003.
 - [43] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr. and M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, *Science* 220, 1983.
 - [44] Visaton-Lautsprecher und Zubehör, Loudspeakers and Accessories, SC 8 N 8 Ohm, *fiche technique*, 2008.
 - [45] C. Prada, F. Wu and M. Fink, The iterative time reversal Mirror : A solution to self focusing in pulse-echo mode, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.90, pp. 1119-1129, 1991.
 - [46] G. Montaldo, M.Tanter and M. Fink, Revisiting iterative time reversal process : applications to ultrafast multiple target detection, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.115, pp. 776-784, 2004.
 - [47] I. Rishabh, D. Kimber and J. Adcock, Indoor localization using controlled ambient sounds, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Sydney-Australia, 13-15th November 2012.
 - [48] C. BARAS, Tatouage informé de signaux audio numériques, *Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications*, 2005.
 - [49] A. Goyé, La perception auditive.Polycopié d'enseignement pour Télécom Paris, *Télécom Paris*, 2002.